

Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Eine Uhr, die auf Schiffen pro Tag
auf zirka drei Sekunden genau geht,
ist undenkbar.*

Isaac Newton, 1714



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Du hast nichts anderes im Kopf,
als Käfer sammeln, Jagen und
Ratten fangen
und wirst dir und der ganzen Familie
nichts als Schande machen.*

*Robert Waring Darwin, 1821,
Vater von Charles*



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

Bakterien sind Hirngespinnste.

Rudolf Virchow, 1870



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Von der Fotografie in natürlichen Farben
ist leider nicht nur für die nächste
Folgezeit,
sondern aus theoretischen Gründen auch
für alle Zukunft
so gut wie nichts zu erwarten.*

Emil du Bois-Reymond, 1890



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Diese Strahlen des Herrn Röntgen werden
sich als Betrug herausstellen.*

William Thomson (Lord Kelvin), 1897



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Alles, was erfunden werden kann,
wurde bereits erfunden.*

Charles Duell, US Patentamt, 1899



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

***Die weltweite Nachfrage nach
Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht
überschreiten –
allein schon aus Mangel an verfügbaren
Chauffeuren.***

Gottlieb Daimler, 1901



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Das Pferd wird es immer geben.
Das Automobil ist nur eine
vorübergehende Erscheinung.*

Wilhelm II., 1906



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Flugzeuge sind interessant,
haben aber keinerlei militärischen Wert.*

Marschall Ferdinand Foch, 1911



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Es gibt nicht das geringste Anzeichen,
dass wir jemals Atomenergie entwickeln
können.*

Albert Einstein, 1932



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Ich denke, dass es einen Weltmarkt für
vielleicht fünf Computer gibt.*

Thomas J. Watson, IBM, 1943



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

*Für einen Reporter, der unterwegs
Notizen aufschreiben will, mag das
interessant sein.
Aber für den Durchschnittsnutzer sind
tragbare Computer unnütz, und es gibt
auch kaum Software dafür.*

Steve Jobs, 1985



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

Das Werk [in Tschernobyl] verfügt über sichere und zuverlässige Kontrollen, so dass die Reaktoren gegen jede Störung mit drei Sicherheitssystemen, die unabhängig voneinander arbeiten, geschützt sind.

Vitali Sklyarow, Energieminister der Ukraine, 1986



Laserantriebe

Die Zeitung ist im Jahr 2000 tot.

Unkonventionelle Antriebe

Bill Gates, 1998

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020



Laserantriebe

Unkonventionelle Antriebe

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart
22. Januar 2020

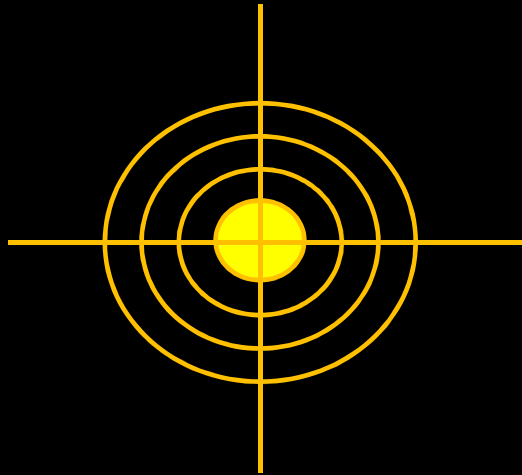
Dr. Stefan Scharring

Institut für Technische Physik, Stuttgart

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.

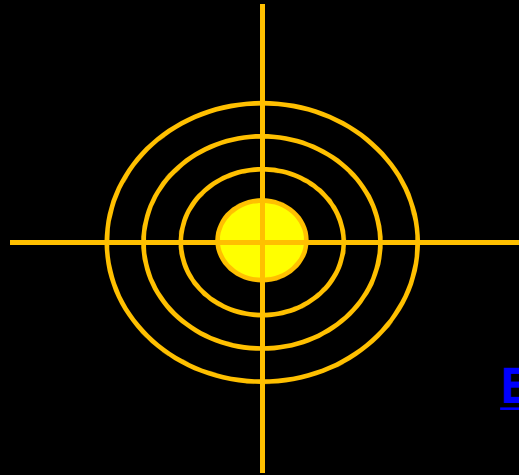


Science Fiction



Experiment 1:

- Schubkraft: max. 6.7 pN
- Leistung Laserpointer:
< 1 mW



Optimierungspotenzial:

- Steigerung der Laserausgangsleistung
- Fokussierung der Laserstrahlung
- Verwendung kurzer Laserpulse
- Anpassung von Material und Wellenlänge

Experiment 2 (CLEANSFACED):

- Mittlere Laserleistung: 33 W
- 3 ns Pulse: 94 MW (Puls)
- 3 mm Fokus: 190 MW/mm²
- Aluminium, $\lambda = 1064 \text{ nm}$
- Energiedichte: 4.7 J/cm²
- Schubkraft: 700 μN

- $c = 21 \mu\text{N/W}$

Motivation

Upload von
Antriebsenergie
MW

Minimaler
Treibstoffverbrauch
<1 %

Satelliten präzise
positionieren
nm - μ m

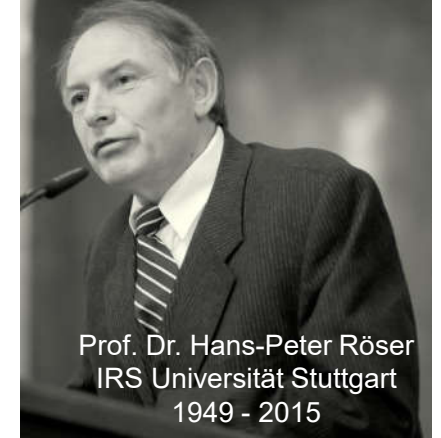
Weltraumschrott aufspüren
und verglühen lassen
cm - dm



*Wenn Du ein Schiff bauen willst,
dann trommle nicht Männer zusammen,
um Holz zu beschaffen, Aufgaben zu vergeben und die
Arbeit einzuteilen,
sondern lehre die Männer die Sehnsucht nach dem
weiten, endlosen Meer.*

Antoine de Saint-Exupery.

Raumfahrt aus Leidenschaft



Prof. Dr. Hans-Peter Röser
IRS Universität Stuttgart
1949 - 2015

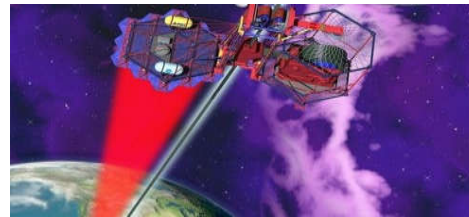


1 Einleitung

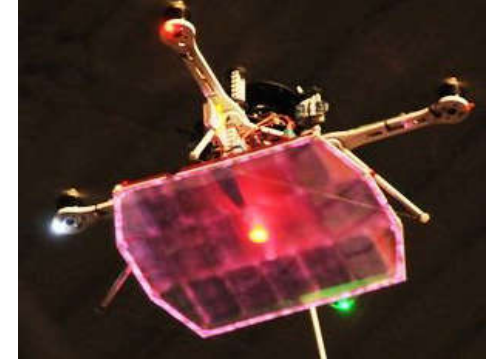
Science vs. Fiction

Laserschneiden
von Stahl

Laserschwert



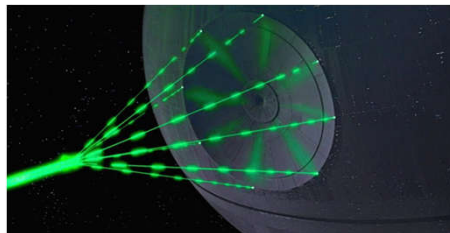
Weltraumfahrstuhl



Quadrocopter



Augen-OP (Lasik)



Todesstern



Photonenantrieb



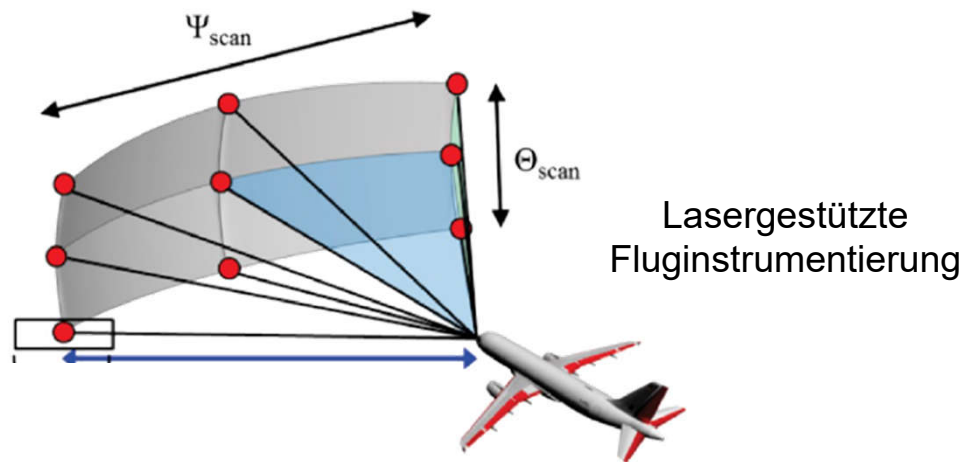
Lasersegel

Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW- LHME II CO₂ laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



DLR – Institut für Technische Physik

Institutsleitung: Prof. Dr. Thomas Dekorsy



Geschichte



Eugen Sänger



Arthur Kantrowitz

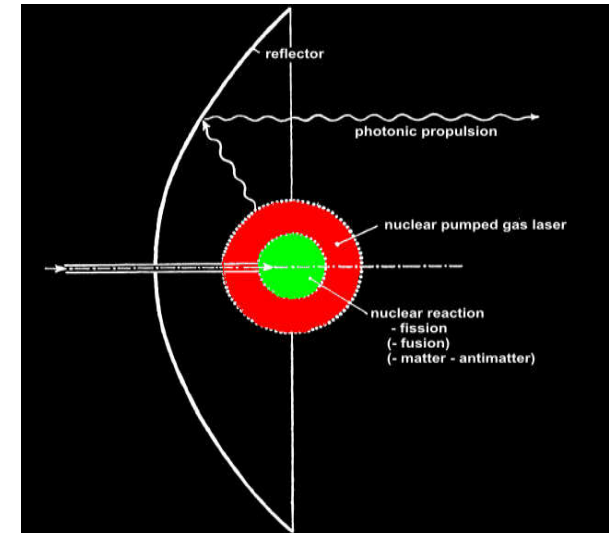
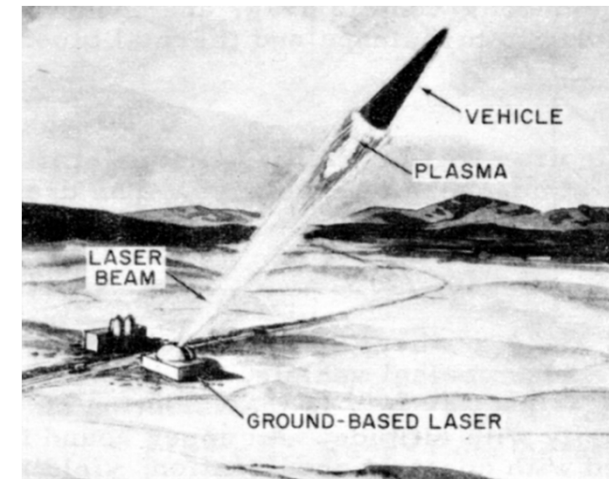


Leik Myrabo



Claude Phipps

1953	E. Sänger	Konzept Photonenrakete
1967	G.A. Askarian	Laser-ablativer Impulsübertrag
1972	A.Kantrowitz	Konzept bodengestützter Laserantrieb
1991	Schall	Laser-basierte Beseitigung von Weltraummüll
1995	Liukonen	Flug im Labor (CO ₂ -Laser)
1997	Myrabo	Freiflug
1998	DLR	Vertikalflug im Labor
2000	Myrabo	Weltrekordflug, 71 m
2002	Phipps	Konzept des laser-ablativen Mikroantriebs
2006	Bae	Photonischer Laserantrieb

W.L. Bohn, Laser Propulsion – Quo Vadis, AIP Conf. Proc. **997**: 47 – 55 (2008)

Pirri et al, Laser propulsion, AIAA paper 72-719 (1972)



Definitionen und Beispiele

Definition Laserantrieb:

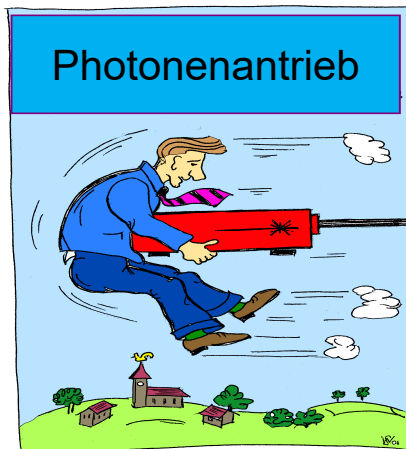
Antrieb, bei dem die Laserenergie einen substantiellen und unverzichtbaren Beitrag zur Bewegungsenergie liefert

Allgemeine Definition Lightcraft:

Antrieb, der auf gerichteter elektromagnetischer Strahlung beruht (Laser oder Mikrowelle)

Lightcraft im engeren Sinne:

Antrieb durch laser-gestützte Detonationen mit räumlich getrennter Laserquelle



Beamed Energy Propulsion – onboard laser



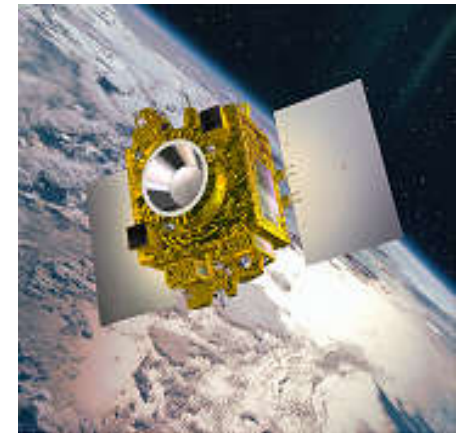
GRACE: © NASA/JPL-Caltech

Alternative Lageregelung im sub- μN bis mN-Bereich für

- wissenschaftliche Missionen
- Formationsflüge zur Erdbeobachtung

Vollständige Vermeidung beweglicher Komponenten für

- langjährige Betriebsdauer
- *trägheitsfreien Betrieb*



MICROSCOPE: © CNES

Minimale Restbeschleunigung $< 10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$

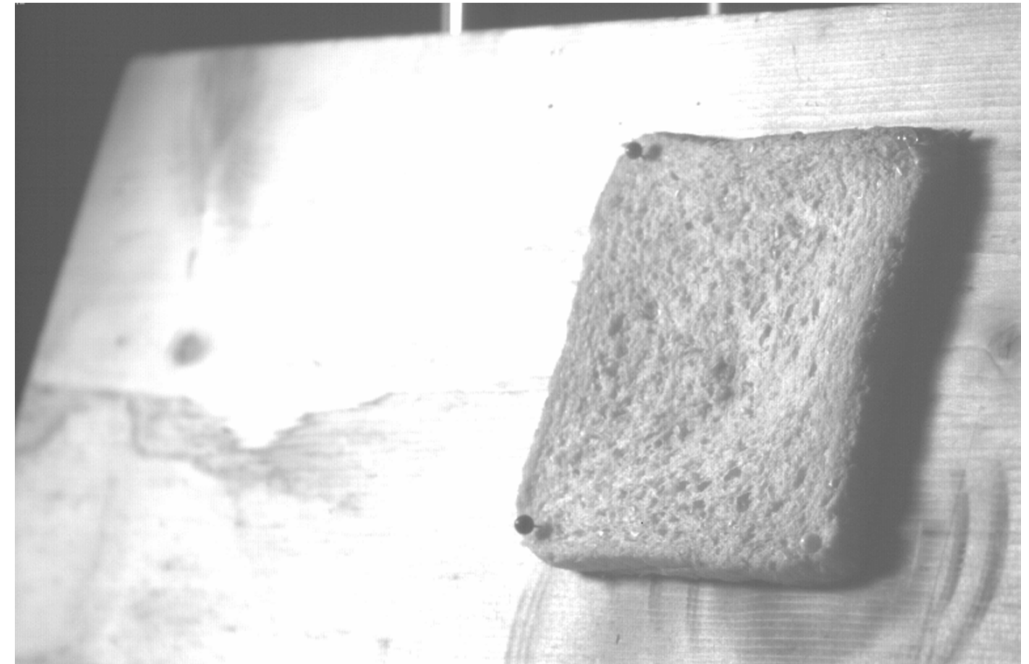
Dittus et al, Applications of Microthrusters for Satellite Missions and Formation Flights Scenarios, Beamed Energy Propulsion, AIP Conf. Proc. **1402**, 367-373 (2011)



1 Einleitung

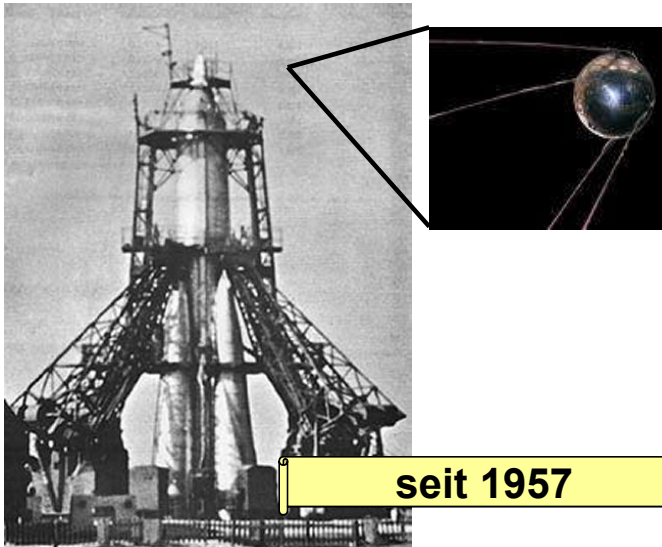
Beispiel: Rückstoß durch Materialabtrag („*unkooperatives Target*“)

- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **unfokussiert**:
 $\sim 290 \text{ kW} / \text{cm}^2$
(solar: $140 \text{ mW} / \text{cm}^2$)
- Repetitionsrate: 50 Hz
- Laserstrahldurchmesser: 8 cm



Beamed Energy Propulsion – Ground-based Laser

Transport des Energieträgers



seit 1957

Nutzlast: Sputnik-I,
83,6 kg, 58 cm
Interkontinentalrakete:
280 t, 34 m

75 Jahre F&E?

Externe Energiequelle



* 2032 ?



seit 1804

75 Jahre F&E

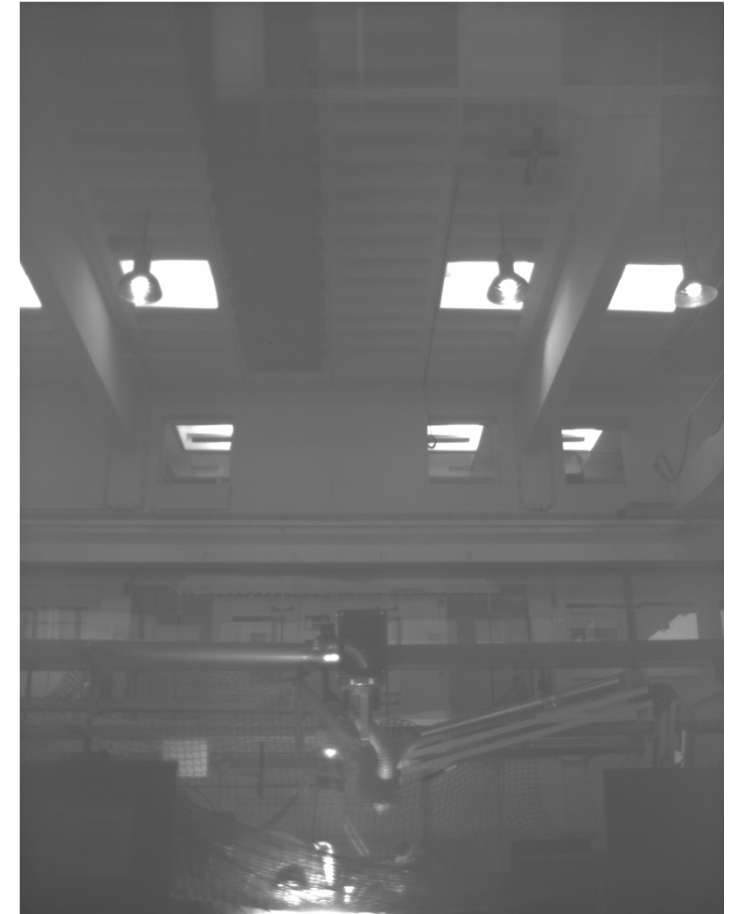
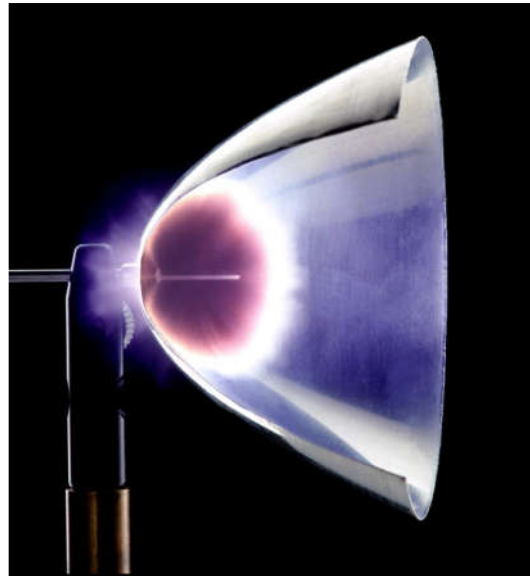


* 1879

1 Einleitung

Beispiel 2: Schuberzeugung in Düse („*kooperatives Target*“)

- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **fokussiert**:
 $3,3 \text{ MW} / \text{cm}^2$
- Repetitionsrate: 50 Hz



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft
- > 3.4 unkooperative Objekte

4 Zusammenfassung

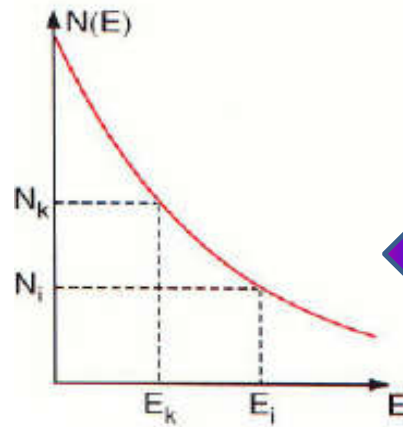


Stimulierte Emission

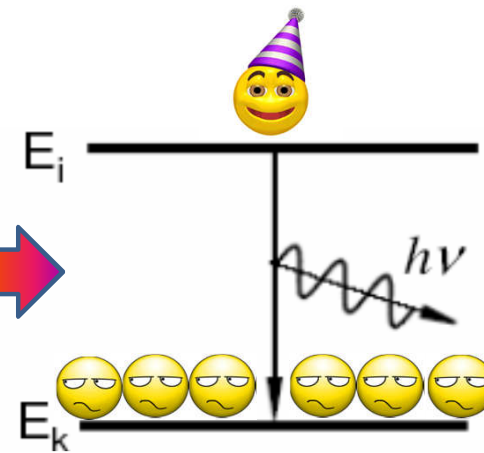


$$E_{rot} = 1/2 \cdot M \cdot \omega^2 R^2$$

Kontinuierliche
Energieübergänge

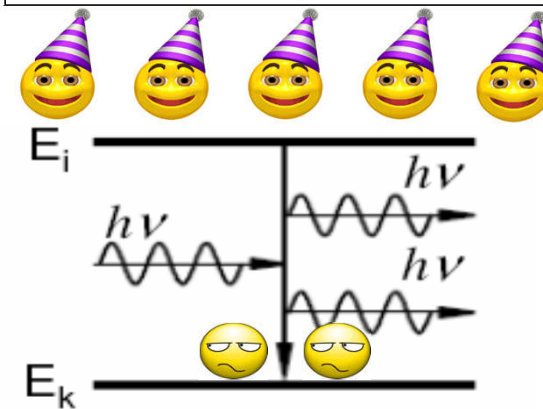


Thermisches Gleichgewicht,
z.B. für Molekülschwingungen,
Elektronenzustände

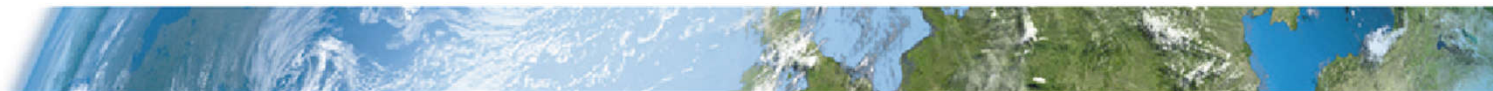
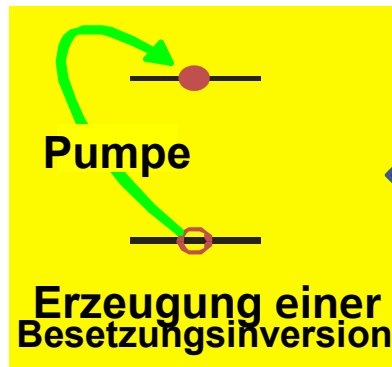


Spontane Emission

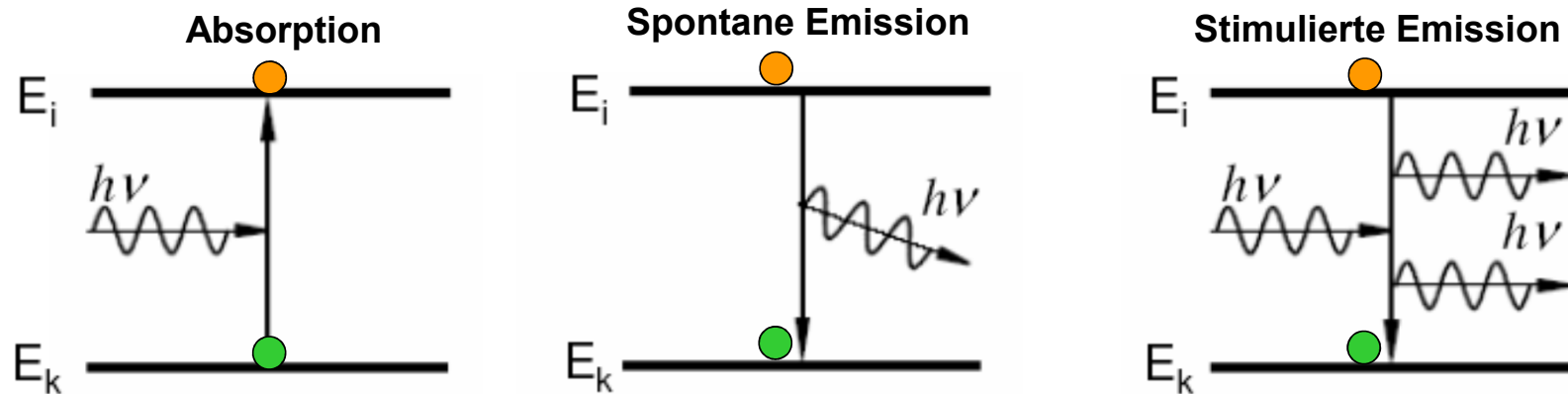
Diskrete (quantisierte)
Energieniveaus



Stimulierte Emission



Light Amplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

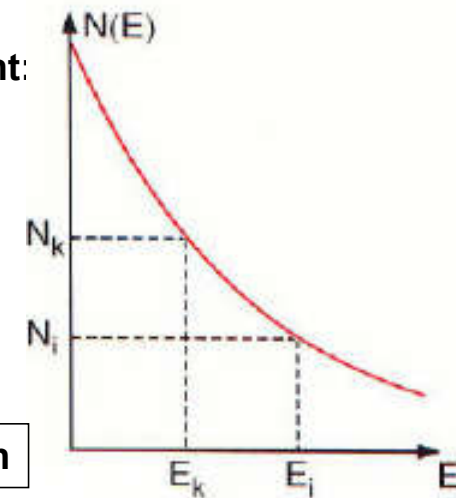


Besetzung der Energieniveaus im thermischen Gleichgewicht:

$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-(E_i - E_k)/kT} = \frac{g_i}{g_k} e^{-h\nu/kT}$$

(Boltzmann-Verteilung)

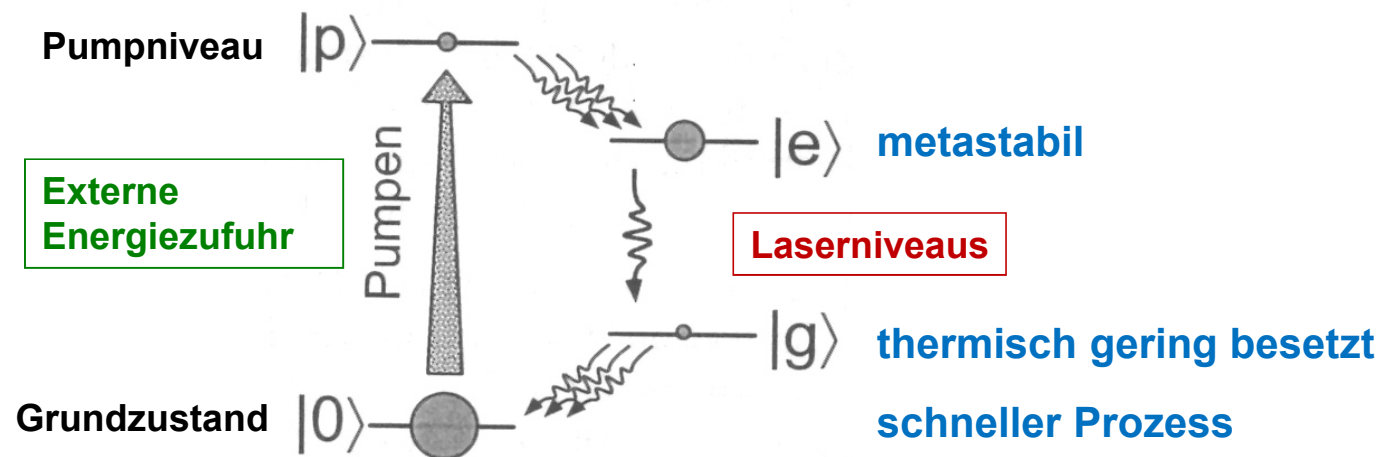
N: Besetzungszahl
g: Entartung der Energieniveaus



Lichtverstärkung ➔ **Besetzungsinversion erforderlich**



Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



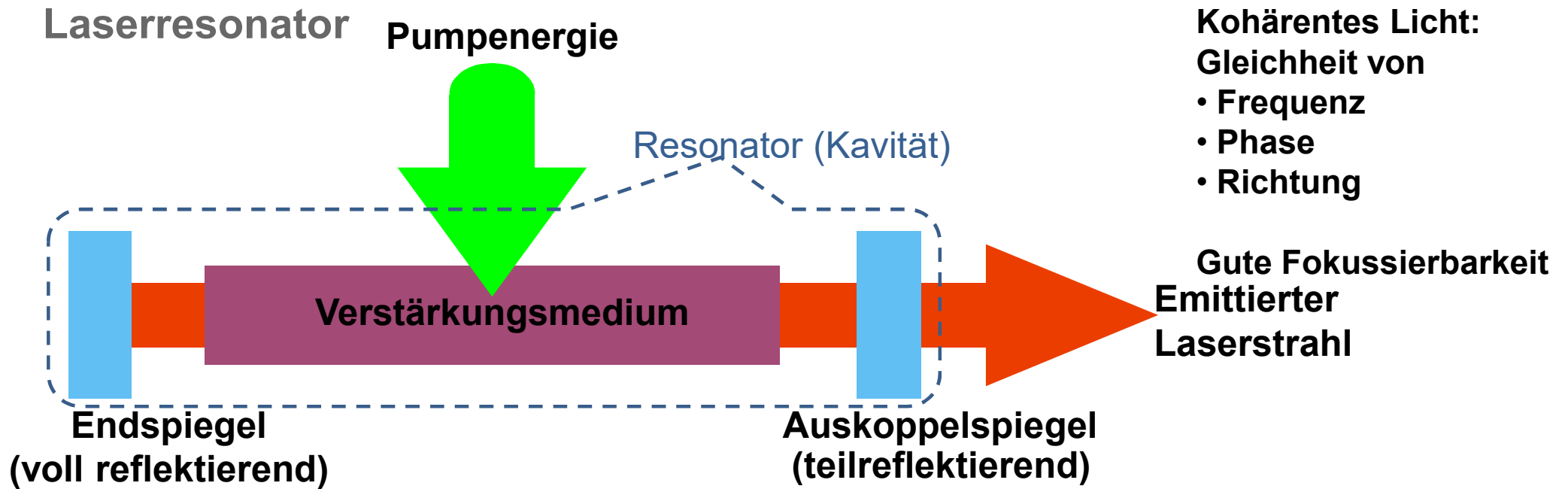
Pumpprozesse:

- Elektronenstoß
- Stöße zwischen Molekülen
- chemische Reaktionen
- ...

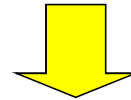
D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Teubner-Verlag 1999, Leipzig



Laserresonator



Kleinsignalverstärkung (materialspezifisch) \gg Absorption

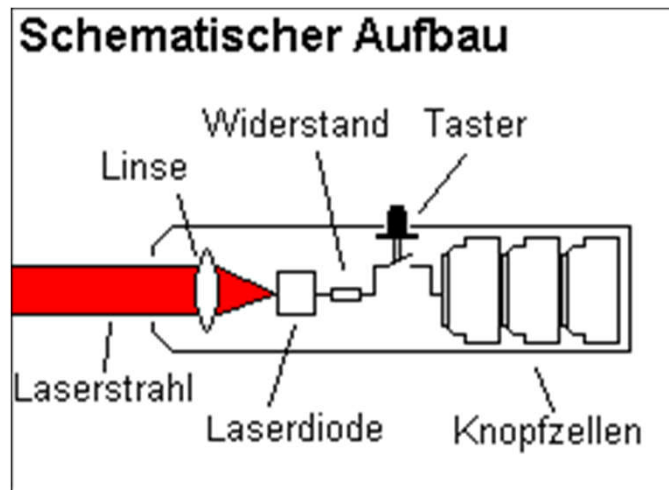


Lichtverstärkung („Photonenlawine“)

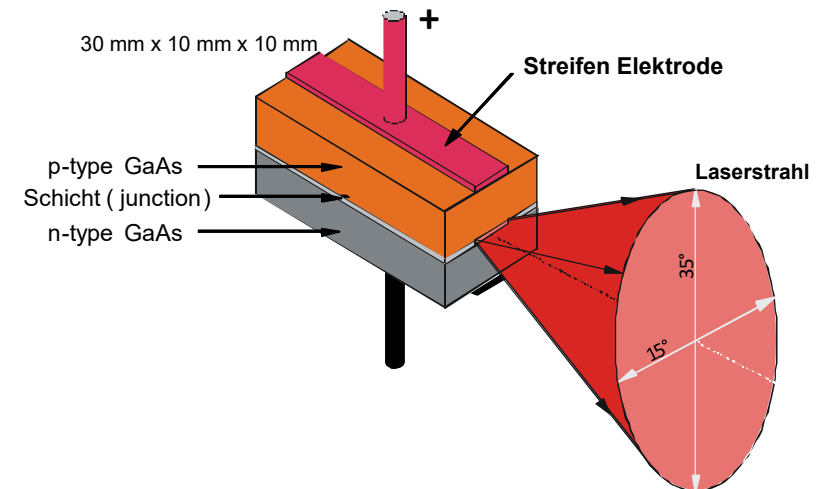


Halbleiterlaser

- **Lichtemission:** Rekombination am pn-Übergang
- **Pumpprozess:** Gleichstrom
- **Resonator:** Teilreflektierende Endflächen



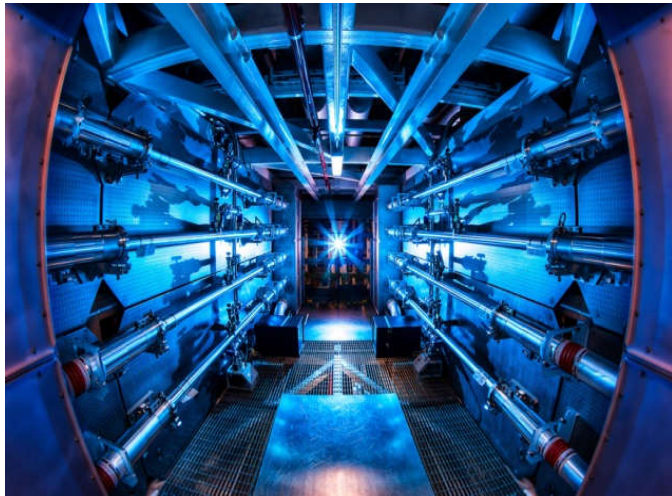
Beispiel: Laserpointer
 $P_{\text{opt}} < 1 \text{ mW}$: augensicher
 bei Lidschlussreflex



- + **hoher Wirkungsgrad (bis 50%, IR)**
- + **Einzelemitter: 100 μW ... 10 W**
- + **kompakte Baugröße**
- **limitierte Strahlqualität**



Festkörperlaser



National Ignition Facility
Fusionsexperimente
> 3 MJ Laserpulsenergie

Laseraktive Ionen + Wirtsmaterial (Glas, Kristall, Polymer...)

Beispiel: Nd:YAG (Reines 4-Niveau-System)

Emission des oberen Laserniveaus $^4F_{3/2}$ (230 μ s):

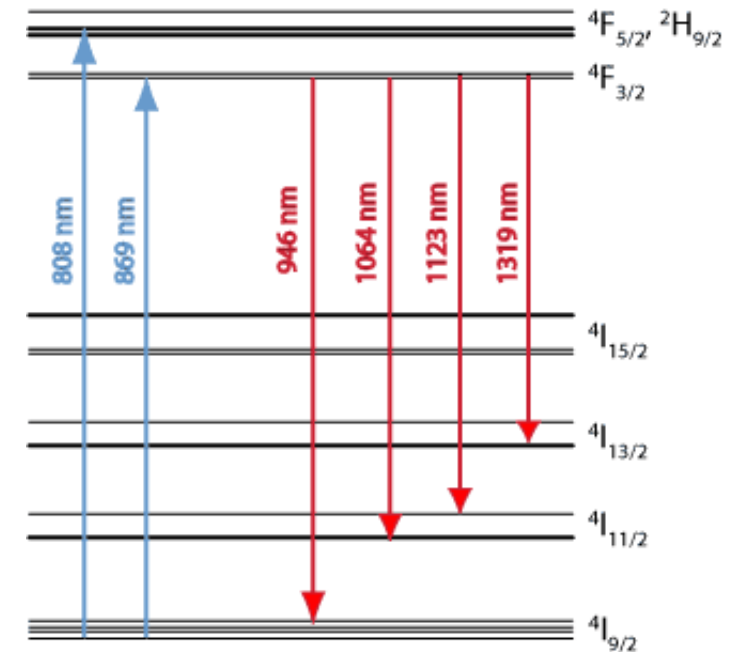
• 1320 nm (~14%) / **1064 nm (~55%)** / 946 nm (~30%)

Pumpprozess: optisch (nahes Infrarot)

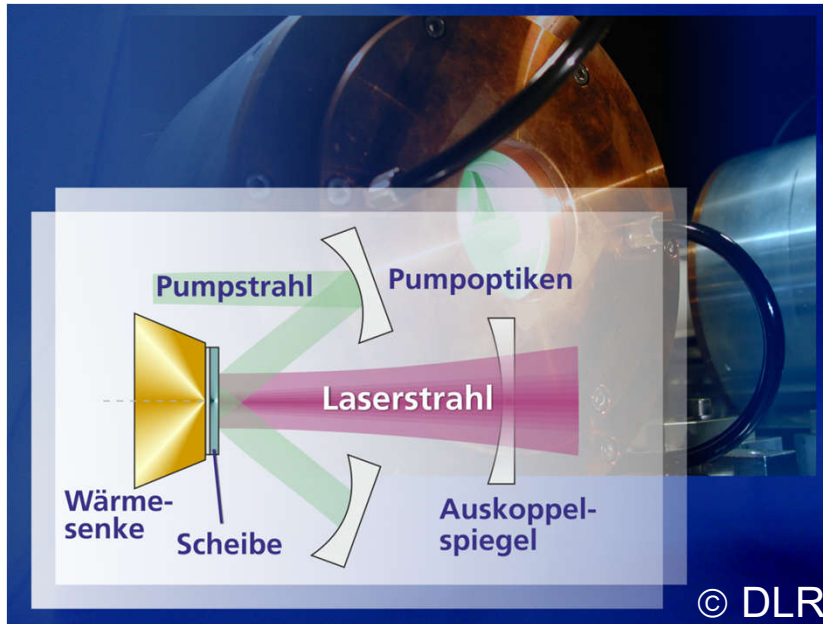
- Gasentladungslampen
- Laserdioden

Thermisches Management?

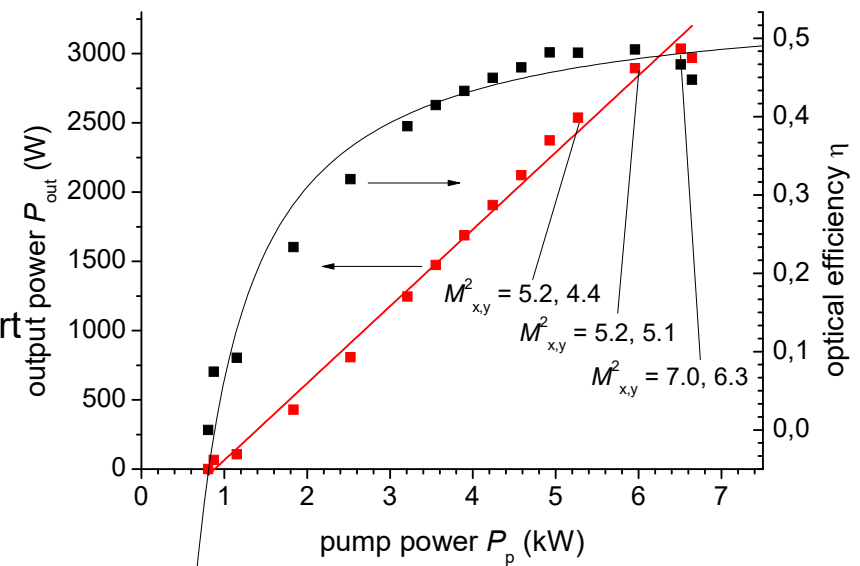
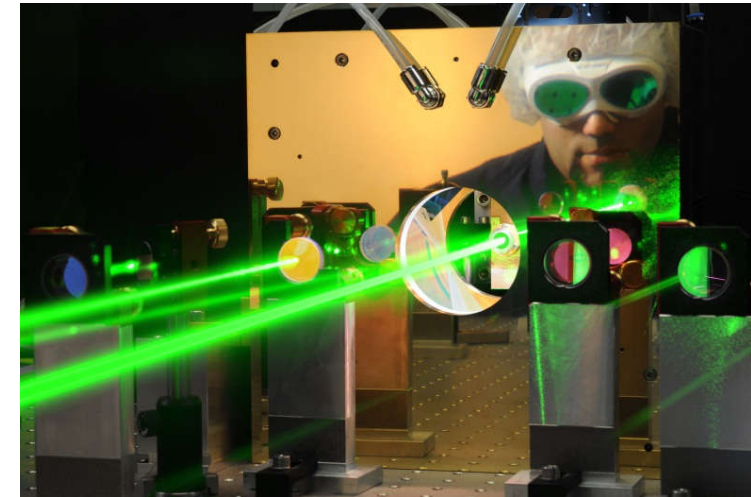
- Erwärmung
- Ausdehnung
- Brechungsindexgradient



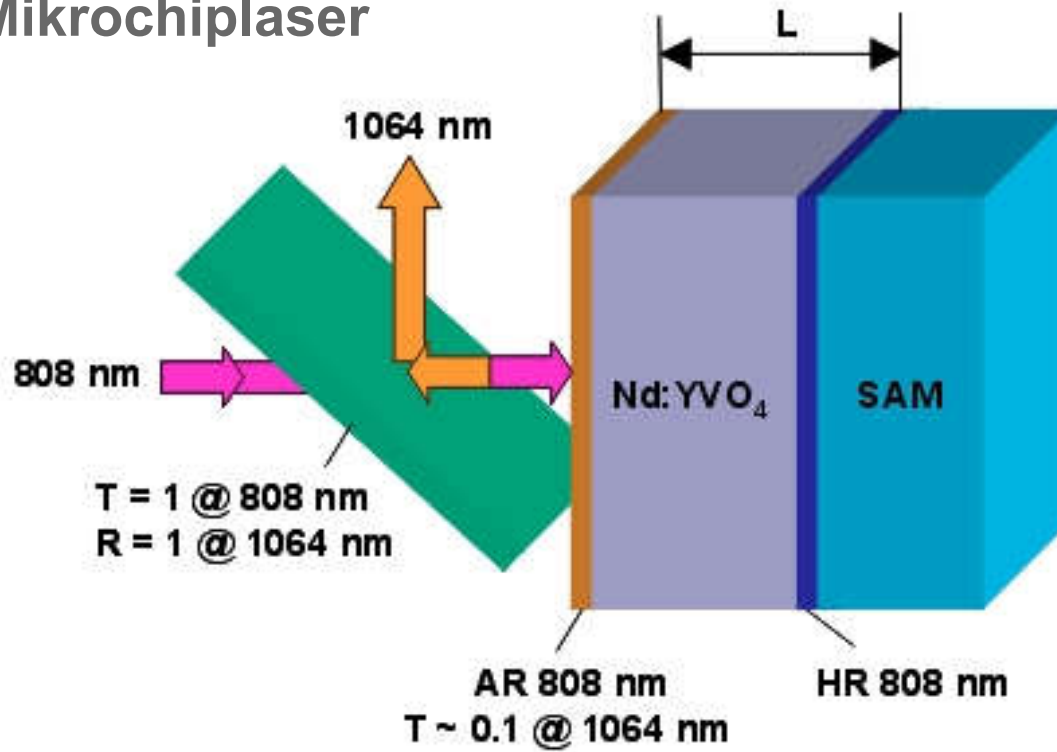
Scheibenlaser



- Gemeinsame Erfindung DLR-TP / IFSW Uni Stuttgart
- 100 – 200 μm Kristallscheibe, z.B. Yb:YAG
- Pumpmodule: Laserdioden
- cw-Betrieb im kW-Bereich, gut skalierbar
- gepulster Betrieb fs – ns möglich
- hohe Brillanz (Leistung x Strahlqualität)



Mikrochiplaser



τ 50 ps
 f_{rep} 100 kHz – 3 MHz
 E_L 4 nJ

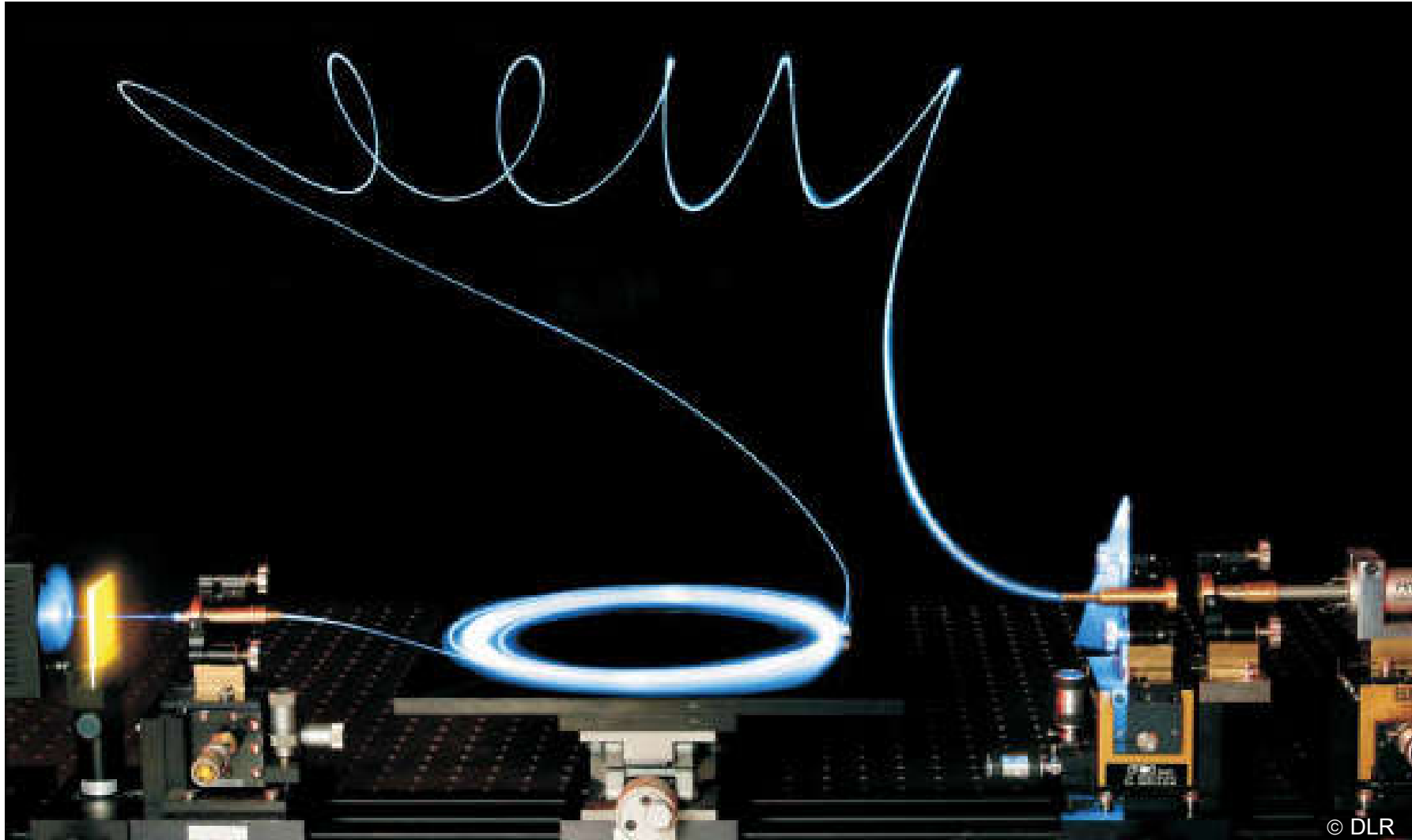
© BATOP optoelectronics, Data sheet microchip MC-1064-50ps



Pumpfleck \varnothing 40 – 80 μm



Faserlaser



Elektrisch angeregter CO₂-Laser

Anregungsschema

Vibrationsanregung durch Elektronenstoß,
DC-Entladung; RF-Entladung

Energietransfer N₂ ⇌ CO₂

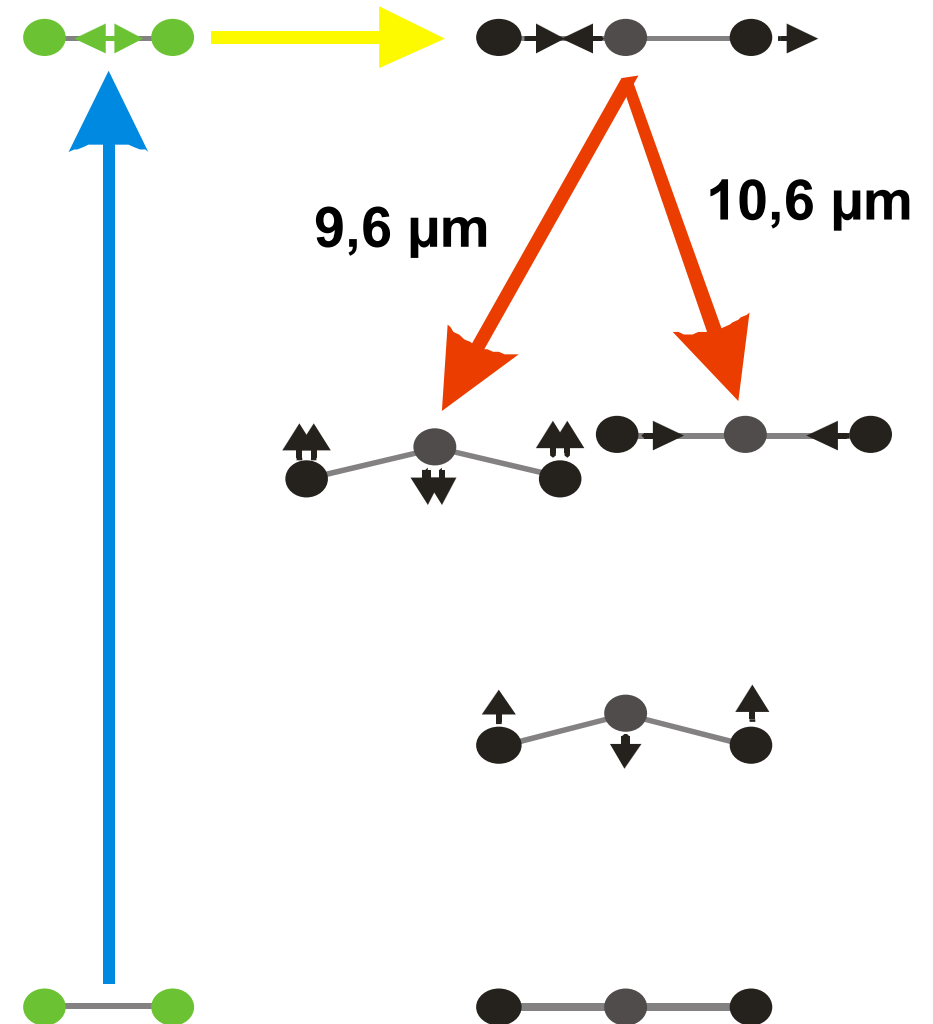
Laseremission 10,6 µm und 9,6 µm

Strahlungslose Relaxation in den
Grundzustand ⇌ Wärme

Vorteil von Gasen:

homogenes Brechungsindexprofil

Kühlung, z.B. durch Gaskreislauf
oder Beimischung von Helium möglich



Natürlicher CO₂-Laser

Emittierte Laserleistung

($\lambda = 9,4 \mu\text{m}$ und $\lambda = 10,4 \mu\text{m}$ kombiniert):

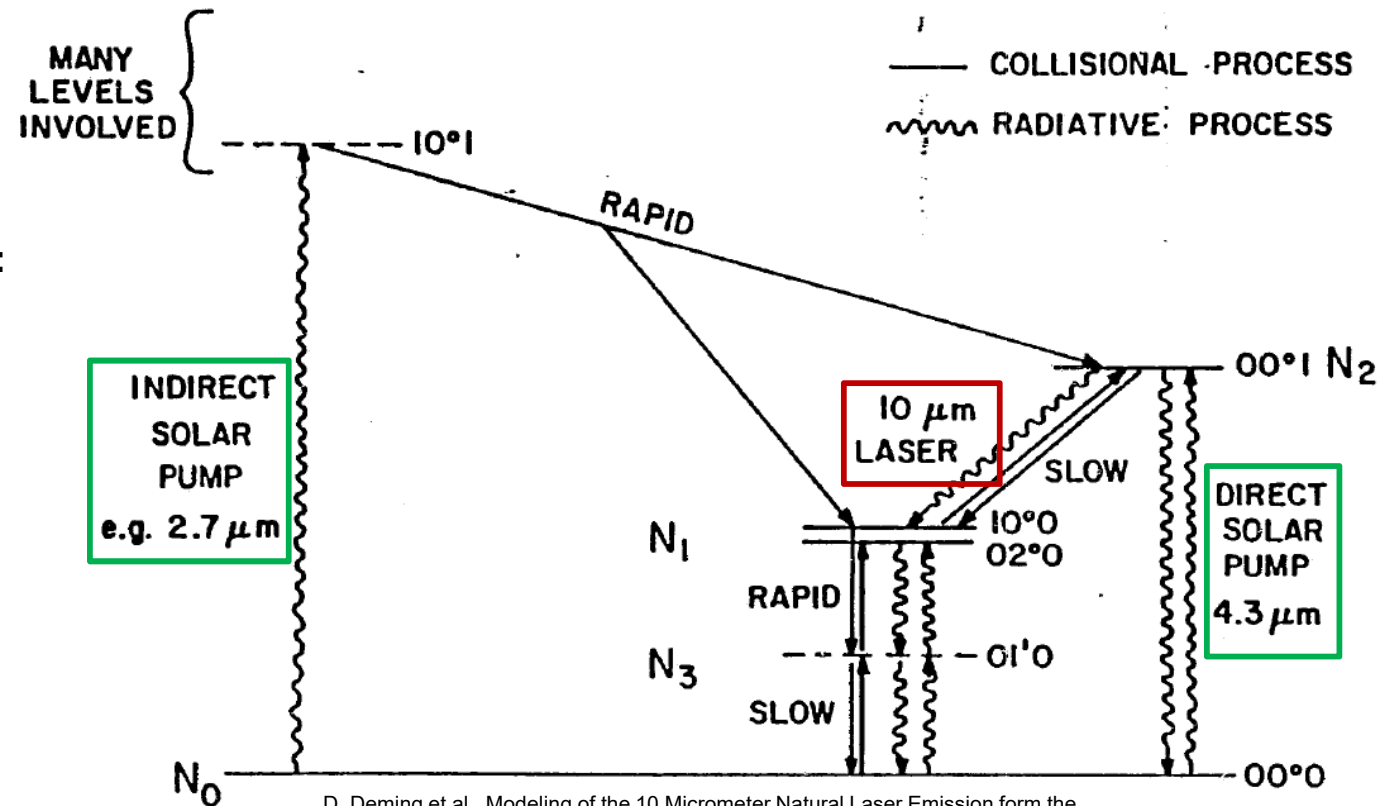
- Mars: $P = 1,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
- Venus: $P = 5,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

D. Deming et al., Observations of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85044, 1983

Maximal zulässige Bestrahlung (mittleres IR):

- Auge: $P_{MZB} = 0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$
- Haut: $P_{MZB} = 0,1 \text{ W}/\text{cm}^2$

MOLECULAR PHYSICS OF NATURAL MARTIAN LASER



D. Deming et al., Modeling of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85045, 1983

„Biolaser“

Einzelne Zelle einer Qualle
im Resonatoraufbau

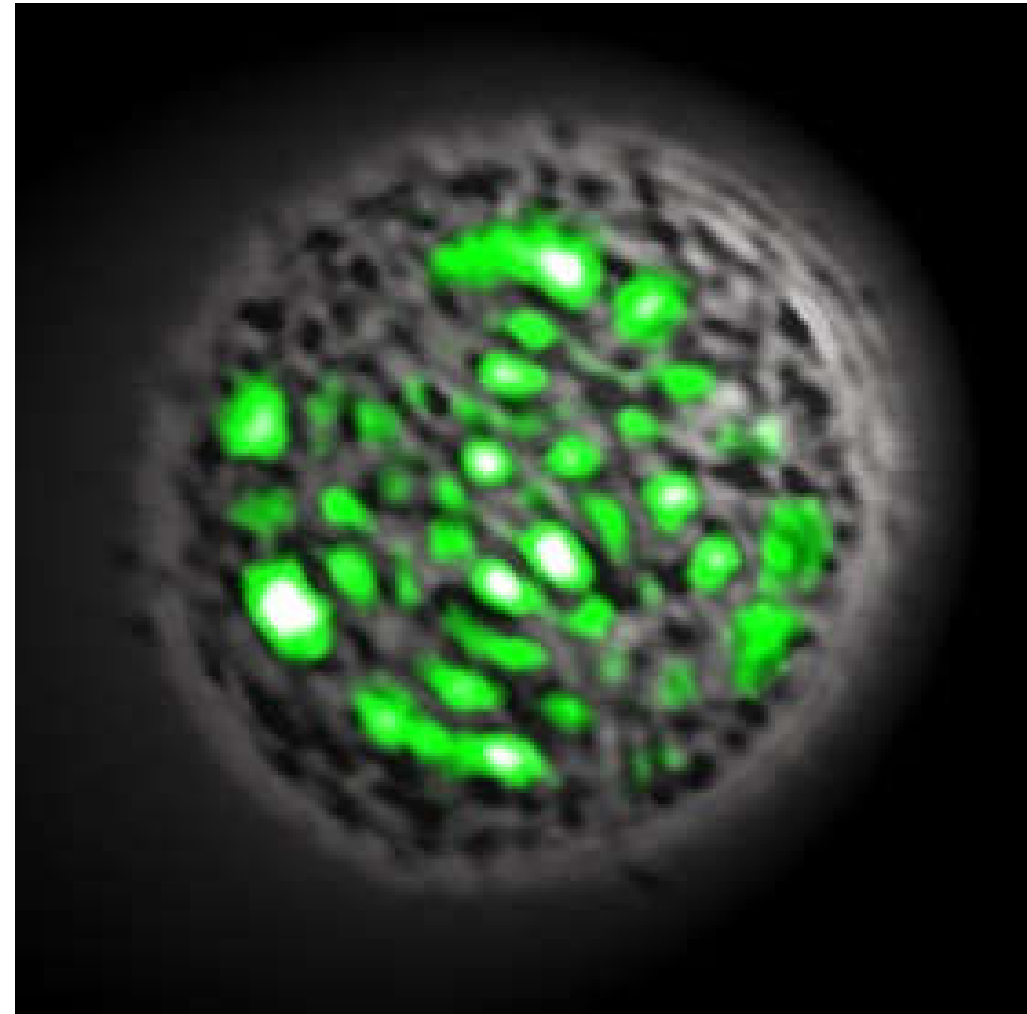
Pumpprozess:

ns/nJ Pulse (blau)

Lasermedium GFP

(green fluorescent protein), $\lambda = 516 \text{ nm}$

Zelle lebt auch nach längerer Laseremission.



M.C. Gather et al, Single-cell biological lasers, Nature Photonics **5**, 406-410 (2011)




Eigenschaften

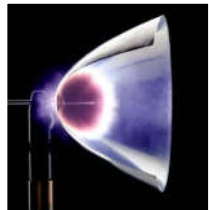
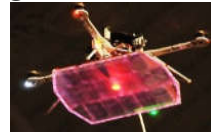
➤ Kohärentes Licht mit Gleichheit von
 ➤ Frequenz  Spektroskopie


Bsp.: Detektion von
Lecks in Gasleitungen

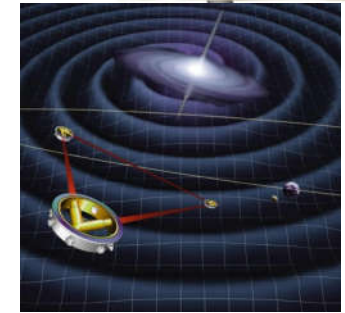
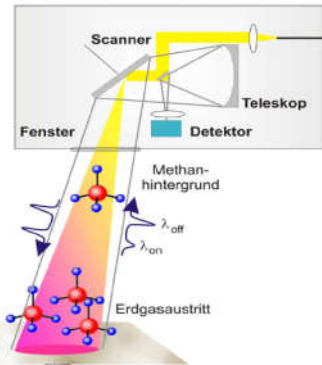
➤ Phase  Interferometrie

Bsp.: Detektion von
Gravitationswellen

➤ Richtung  große Reichweite, gute Fokussierbarkeit



➤ Laserpulse  hohe Intensitäten in kurzen Zeitskalen (μs – fs)
 Kurzzeitdynamik



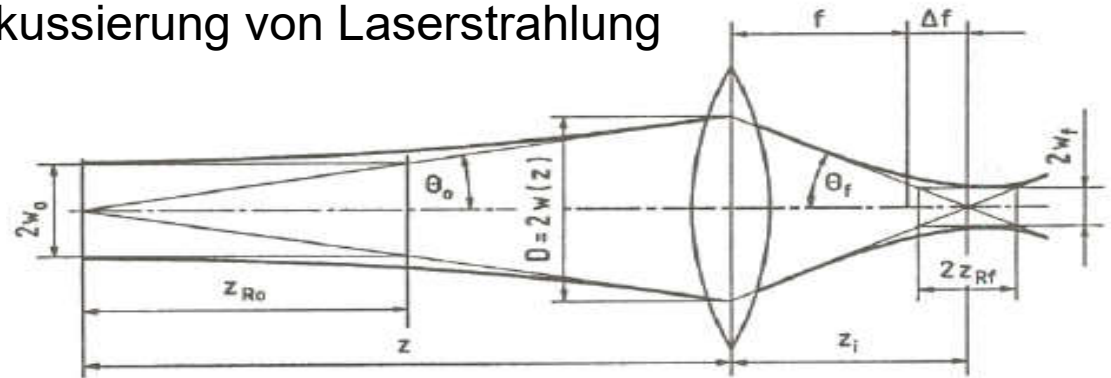
Fokussierbarkeit

Fokussierung von Sonnenlicht



Untergang der Römischen Flotte,
Hitzestrahl des Archimedes,
Syracus, 212 v. Chr.

Fokussierung von Laserstrahlung



H. Hügel, Strahlwerkzeug Laser, Teubner-Verlag 1992, Stuttgart

Strahlparameterprodukt

$$w_0 \Theta_0 = w_f \Theta_f = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi}$$

- w Strahltaile
- Θ Divergenzwinkel
- M^2 Strahlqualitätsparameter
- konstant bei Durchgang durch optische Elemente
- idealer Gaußstrahl: $M^2 = 1$
- sehr hohe Intensitäten möglich

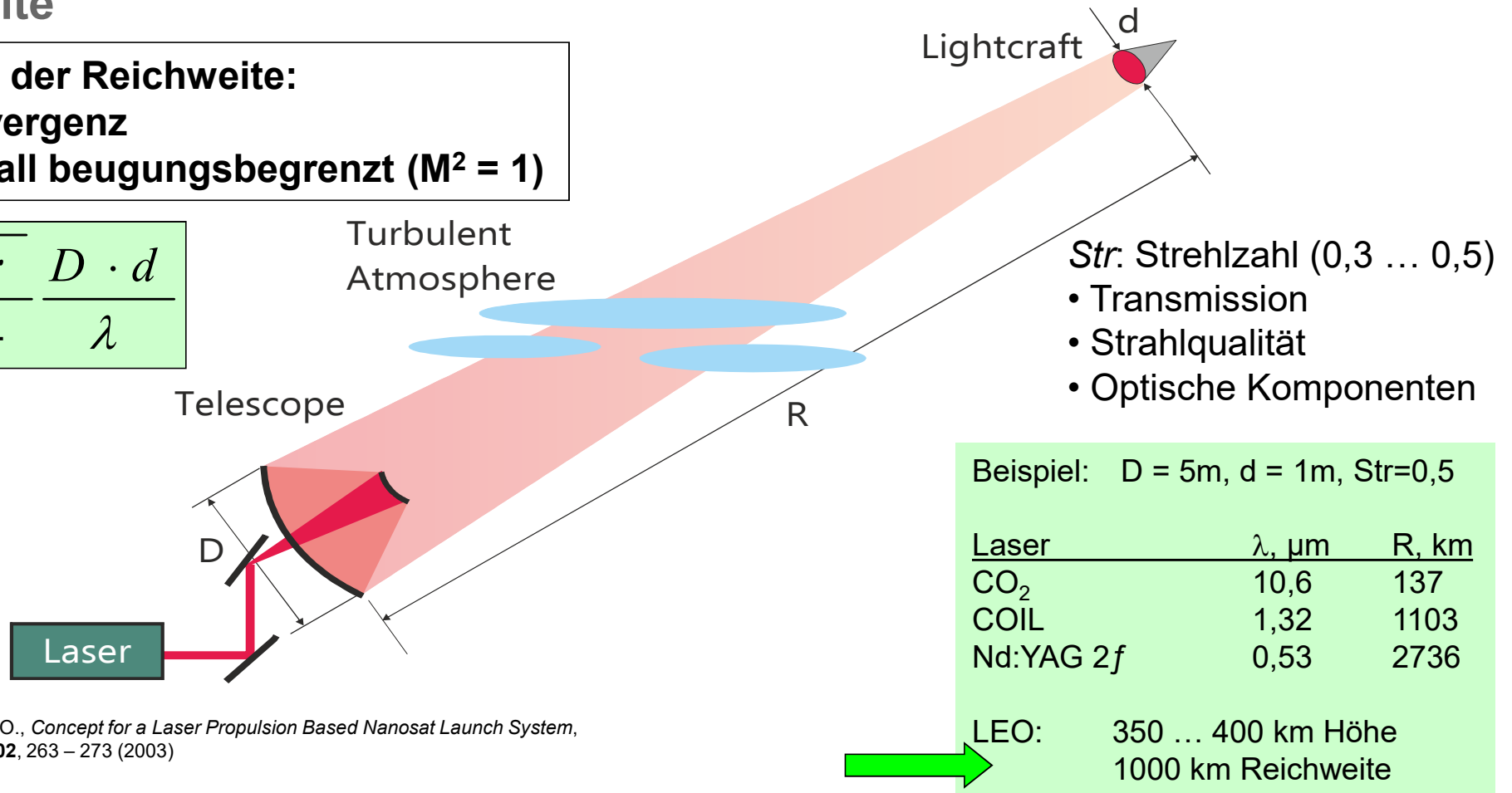


Reichweite

Begrenzung der Reichweite:

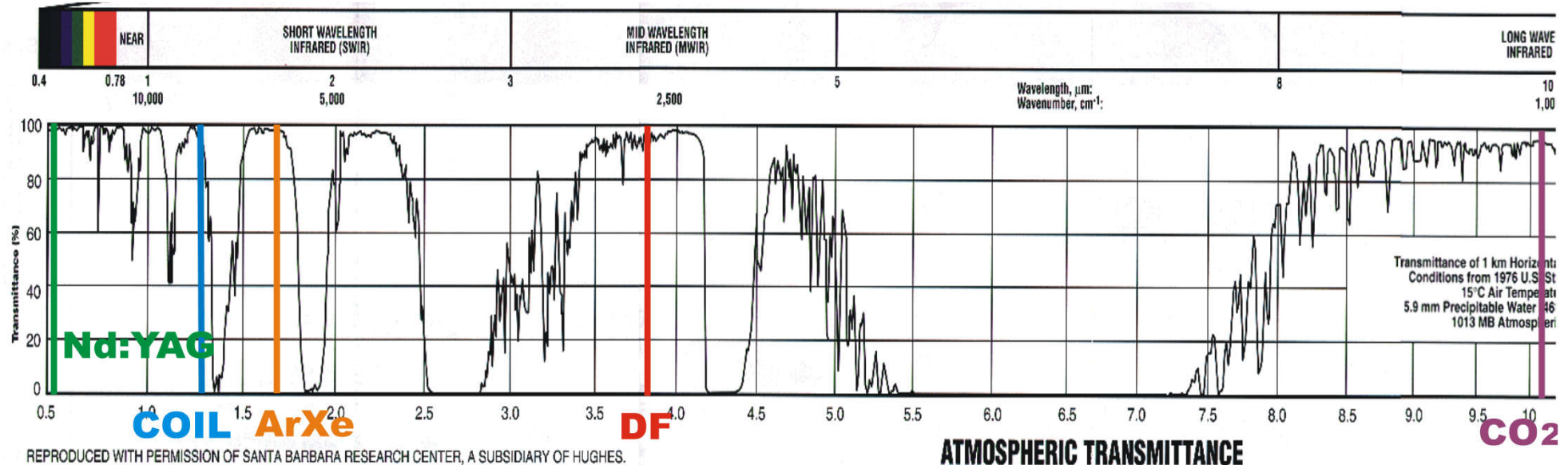
- Strahldivergenz
- im Idealfall beugungsbegrenzt ($M^2 = 1$)

$$R = \frac{\sqrt{Str}}{2,44} \frac{D \cdot d}{\lambda}$$



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)

Atmosphärische Transmission



- Streuung an Partikeln – wetterabhängig, größenabhängig
- Turbulenz
 - Strahlwanderung / -aufweitung
 - Modifikation der Fokussierung
 - insbesondere bei Erhitzung durch Absorption an Partikeln (Thermal Blooming)



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

> 3.1 Überblick

- > Systematik und Kenngrößen
- > Photonenantrieb
- > Photovoltaische Laserantriebe
- > Thermische Laserantriebe
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft
- > 3.4 unkooperative Objekte

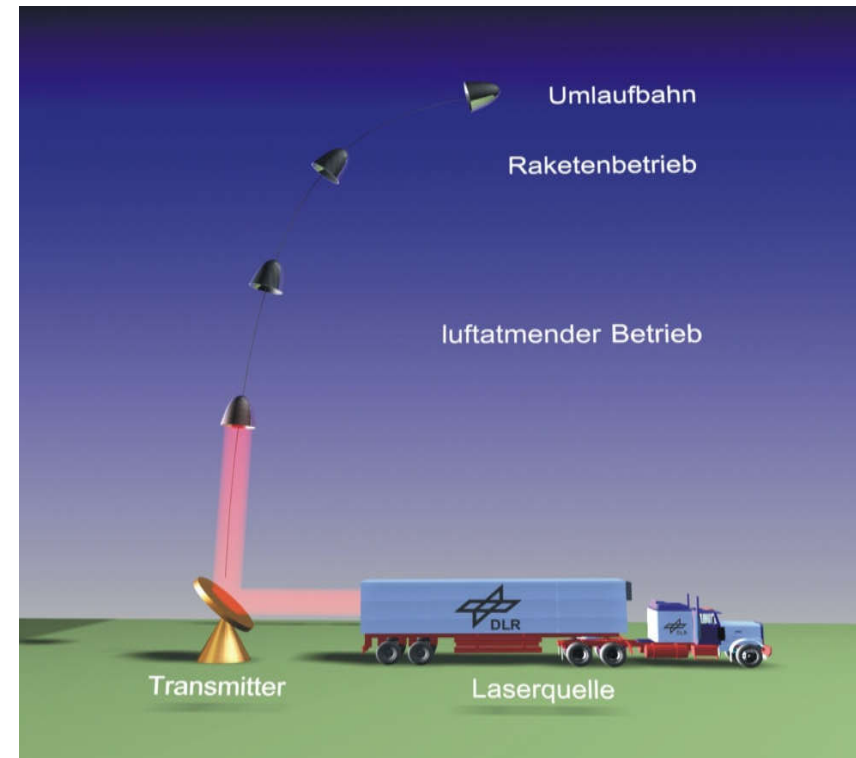
4 Zusammenfassung



Antriebskonzepte

Arten der Wechselwirkung

- Reflektion – **Photonenantrieb**
- Absorption
– **Photovoltaische Laserantriebe**
- Erwärmung, Ionisierung
– **Thermische Laserantriebe**
 - Materialabtrag
– **Ablative Laserantriebe**
 - Detonation und Verbrennung
– **Laser Lightcraft**



Laserbasierter Raketenantrieb



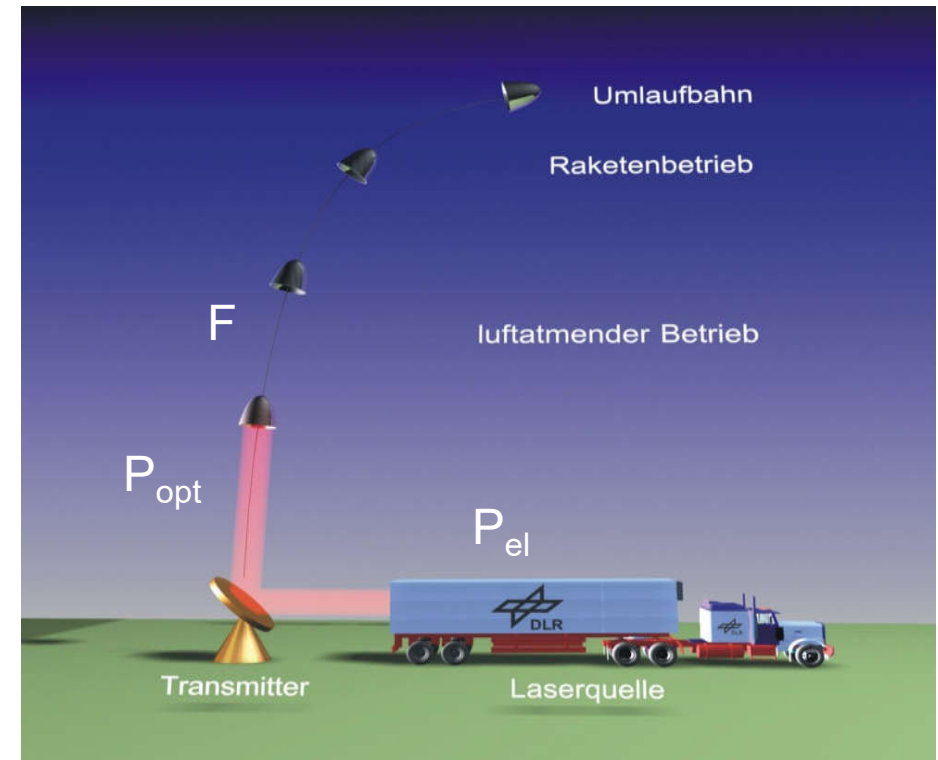
Schub-/Leistungsverhältnis

Impulskoppelkoeffizient (Antrieb):

$$c_m = \frac{F}{P_{opt}} = \frac{\Delta p}{E_L}$$

Impulskoppelkoeffizient (System)

$$c_{m,sys} = \frac{F}{P_{el}} = \eta_{el-opt} \cdot c_m$$



Laserbasierter Raketenantrieb



Concept for interstellar missions

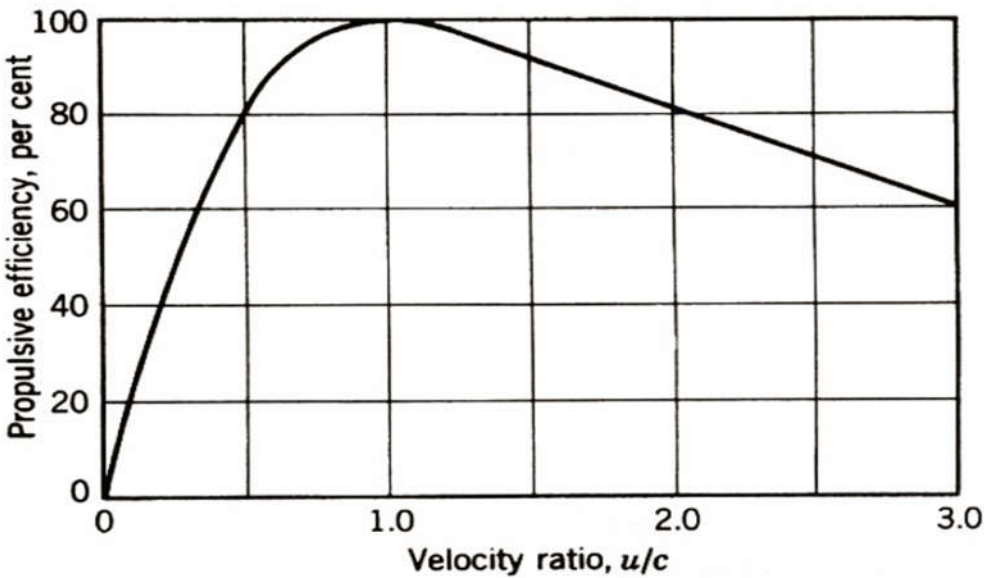
Photon pressure:

- very low momentum coupling

$$c_m = \frac{2 p_{Photon}}{E_{Photon}} = \frac{2 h \nu \cdot c^{-1}}{h \nu} = \frac{2}{c} = 6.7 \text{ nN} / W$$

- high efficiency at relativistic speeds
 - Example for $v = 0.25 \text{ c}$ travel velocity

$$\eta_{prop} = \frac{2 v / v_{jet}}{1 + (v / v_{jet})^2} = \begin{cases} 47 \% \quad (v_{jet} = c) \\ 0,03 \% \quad (v_{jet} = 5 \text{ km} / \text{s}) \end{cases}$$



G.P. Sutton et al, Rocket Propulsion Elements (2001)



Breakthrough Starshot

- Destination α Centauri
- S/c: Lightsail (4 m \varnothing , 0.25 μm , 3.6 g incl. payload)
- Propulsion: Photon pressure
- Launcher: 200 GW laser transmitter array
- Acceleration: 9 minutes, 15000 G, to 0.2 c (near Mars)
- Funding: initially 100 M\$; intended: 40 B\$, 40 years

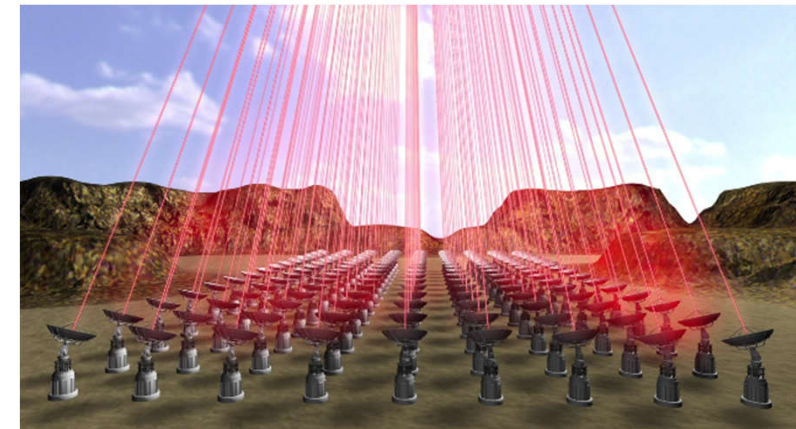
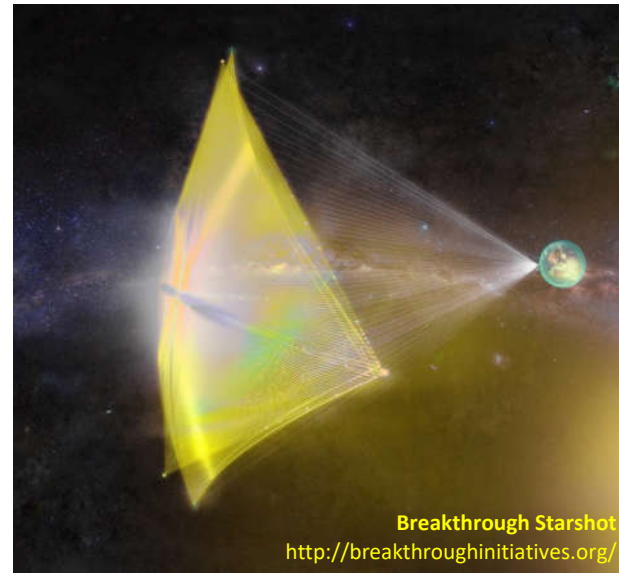
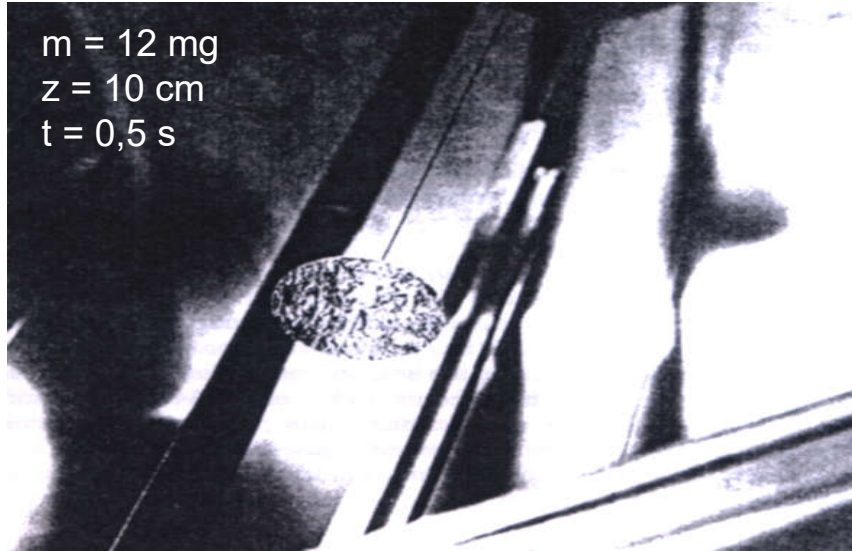
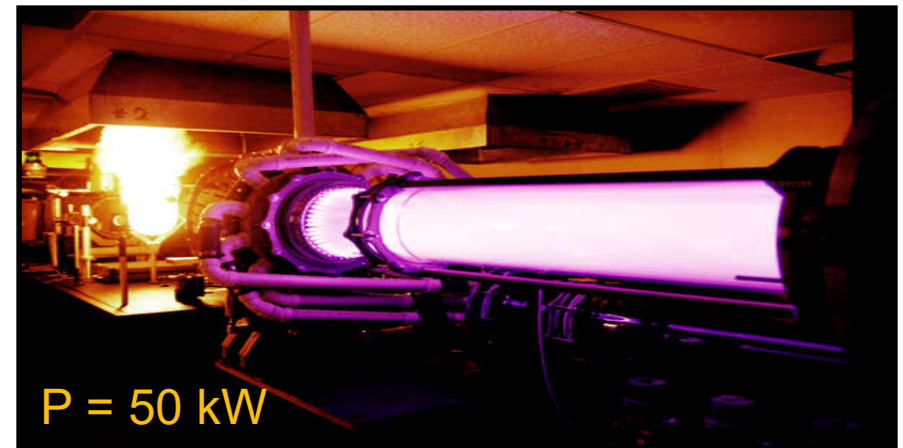


Image and data courtesy of Claude Phipps

Laser lightsail at a high power laser



Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW-LHMEL II CO₂ laser,
Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)

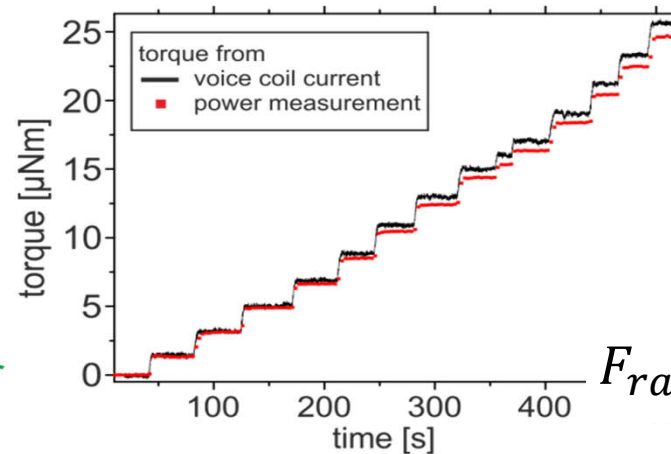
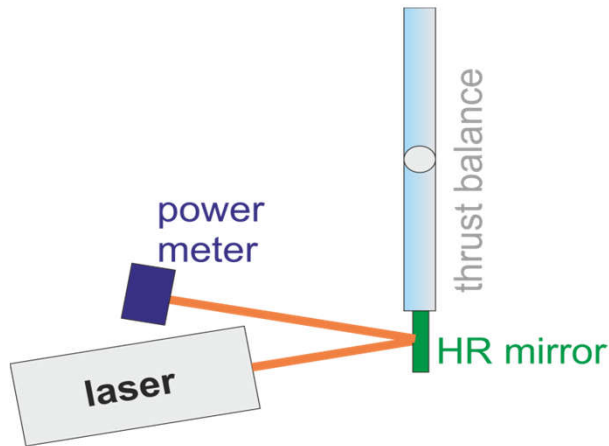


CO₂-Laser (cw)
Laser Hardened Materials Evaluation Laboratory
Wright Patterson Air Force Base



Exkurs: Kalibration durch Photonendruck

Extra-cavity



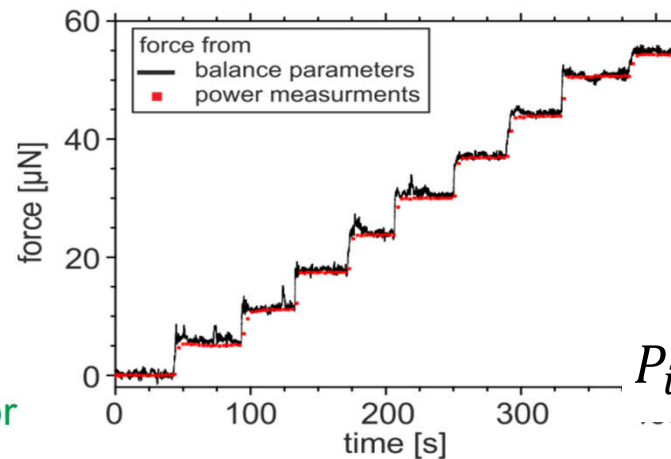
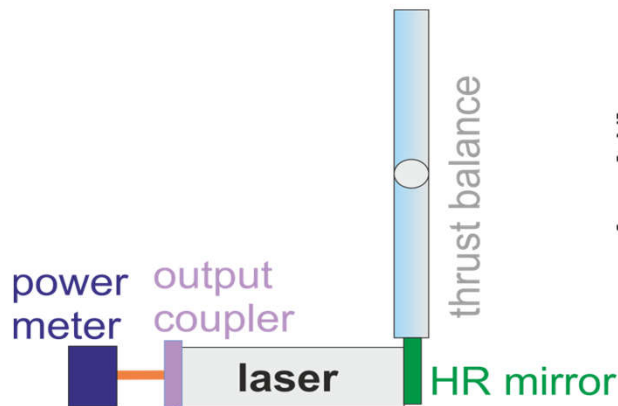
Laser: 1 kW Scheibenlaser

HR: Hochreflektierender
Spiegel, $R = 99.98\%$

Einfallswinkel $\vartheta = 10^\circ$

$$F_{\text{radiation}} = (1 + R) \cdot \frac{P_{\text{ext}}}{c} \cdot \cos(\vartheta)$$

intra-cavity



HR-Spiegel = Endspiegel
der Laserkavität

Auskoppelspiegel: $T = 2.4\%$

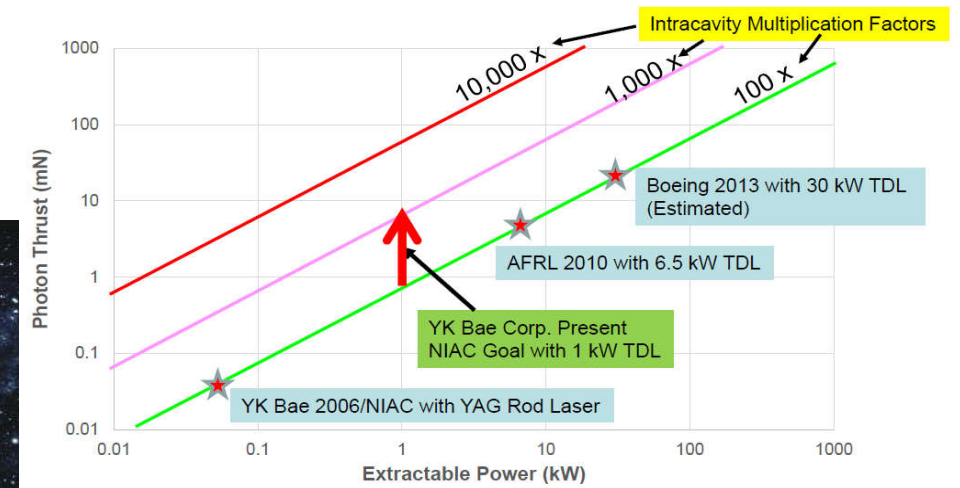
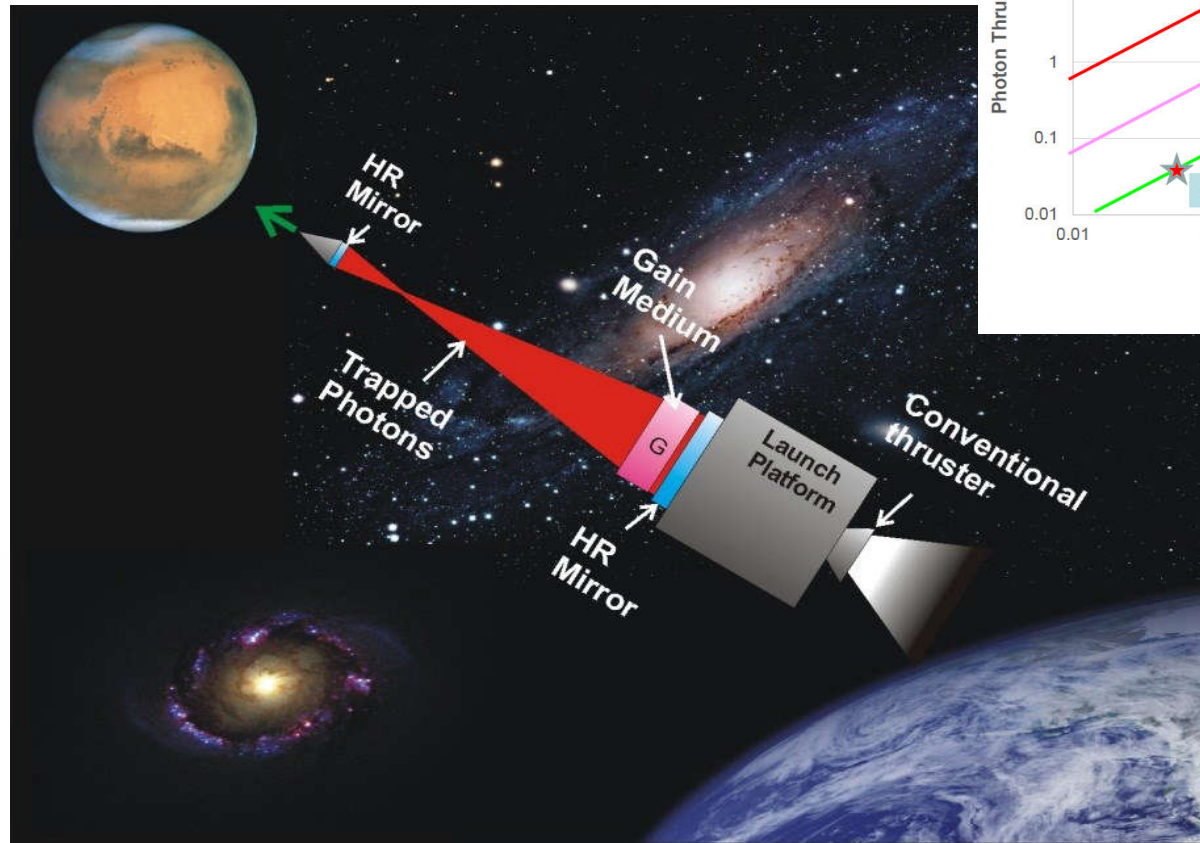
$\vartheta = 0^\circ$

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} \frac{1 - T}{T} \approx 41 \cdot P_{\text{ext}}$$

S. Karg et al., Laser Propulsion Research Facilities at DLR Stuttgart,
Proceedings of HPLA/BEP 2014



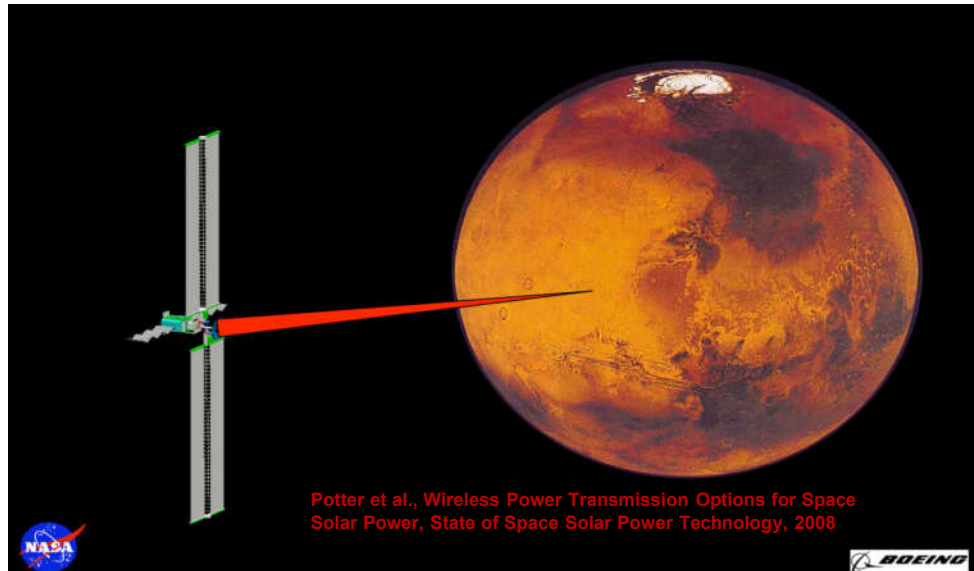
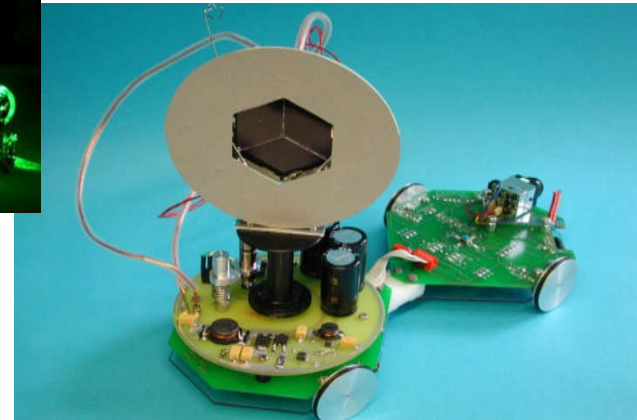
Photonenantrieb – intra-cavity



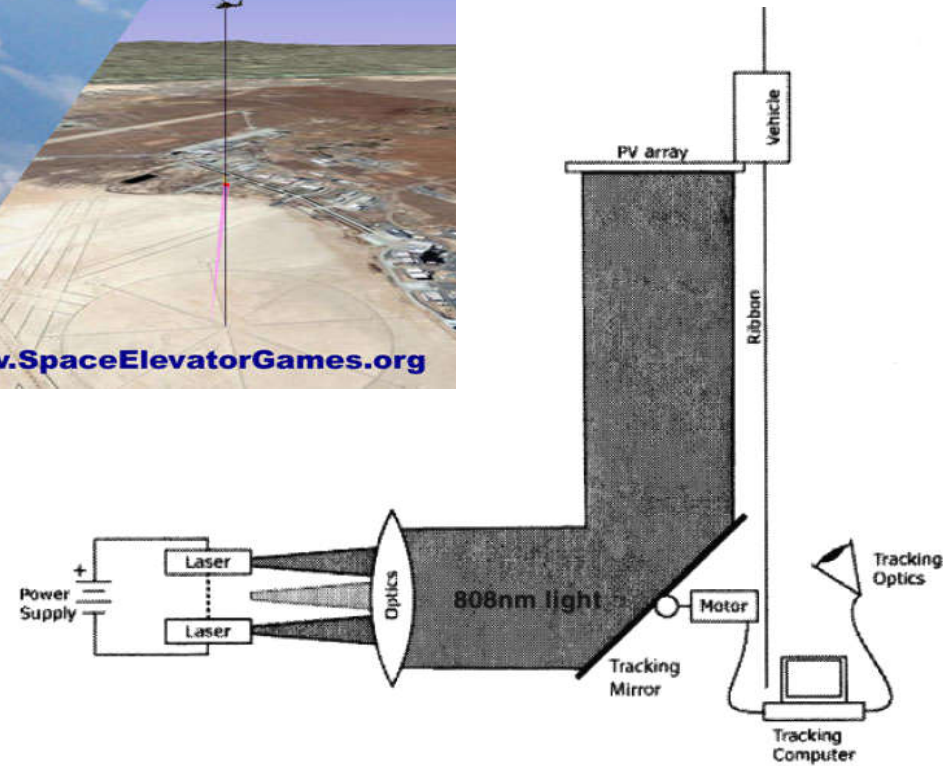
TDL: Thin Disk Laser

Y.K.Bae, The Past, Present and Future of Photon Propulsion, Proceedings of HPLA/BEP 2014

Energieversorgung im Planetenschatten



Space Elevator

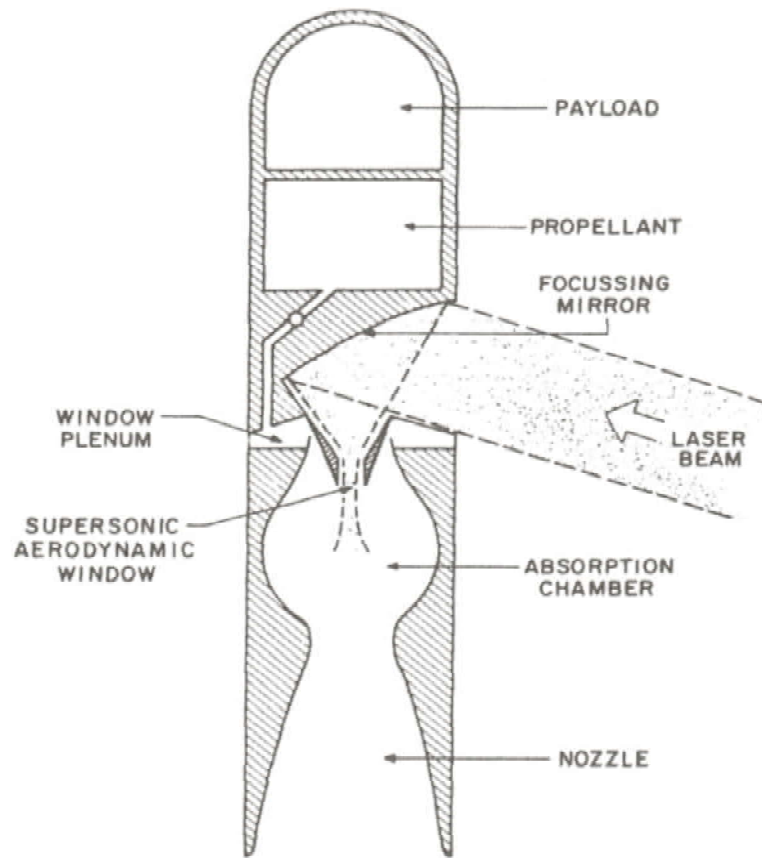


J.T. Kare et al, Laser Power Beaming on a Shoestring, AIP Conf. Proc. **997**, 97-108 (2008)

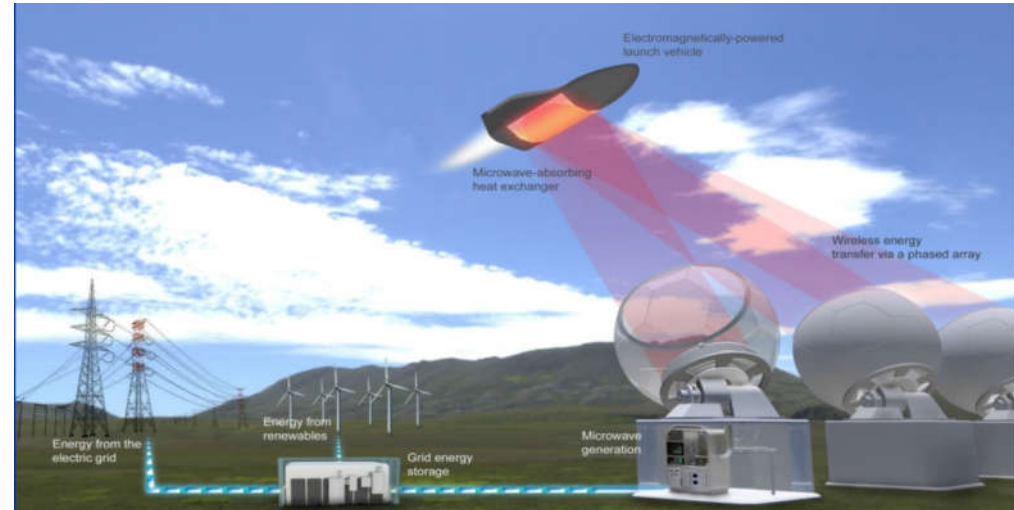
B.C. Edwards, The Space Elevator: an Ideal Application for the Free Electron Laser, Proc. SPIE **4632**, 134-140 (2002)



Thermische Laserantriebe



R.F. Weiss et al., Laser Propulsion, Astronautics and Aeronautics, March 1979: 50 – 58



J. Coopersmith et al., A Strategic Roadmap for Commercializing Low-Cost Beamed Energy Propulsion Launch Systems, AIAA Space 2016

Funktionsprinzip:

- Aufheizen eines Treibstoffes durch fokussierten Laserstrahl
- Schub durch Expansion

Laserquelle: cw oder gepulst



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Ausbreitung von Laserstrahlung

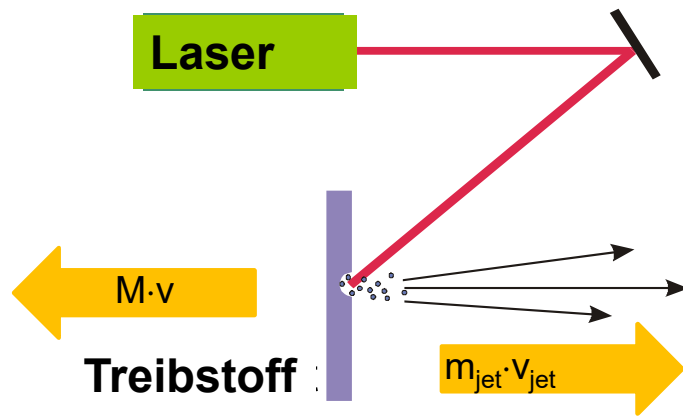
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > **3.2 Ablative Laserantriebe**
 - > 3.2.1 Antriebsprozess
 - > 3.2.2 Mikroantriebe USA
 - > 3.2.3 Mikroantrieb DLR
 - > 3.2.4 Hybride laser-elektrische Antriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft
- > 3.4 unkooperative Objekte

4 Zusammenfassung

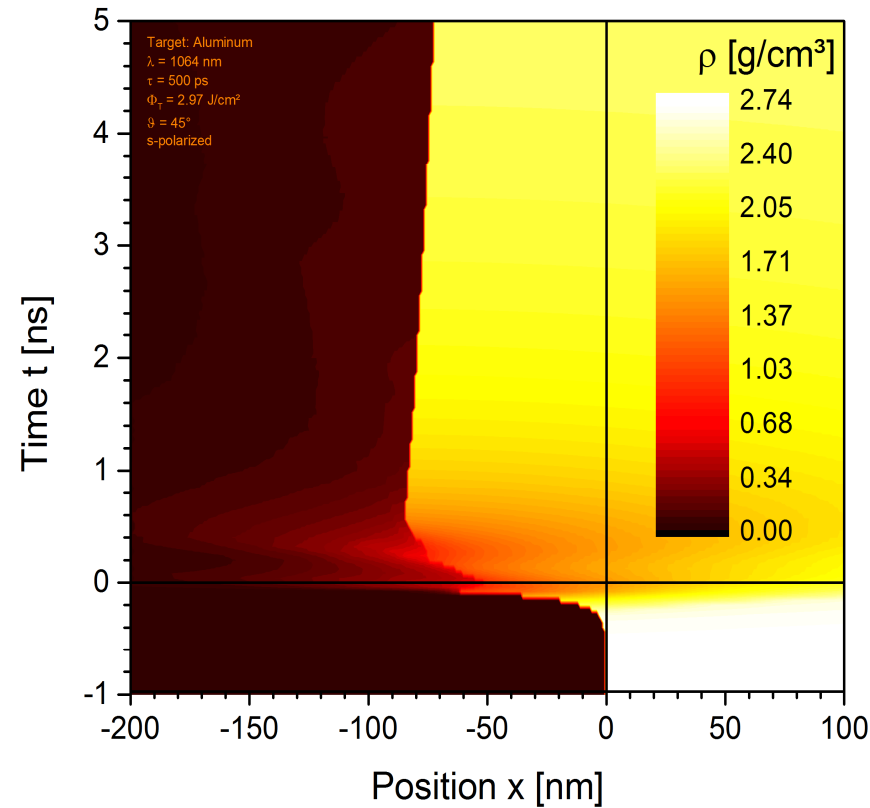


Laserinduzierter Ablationsprozess

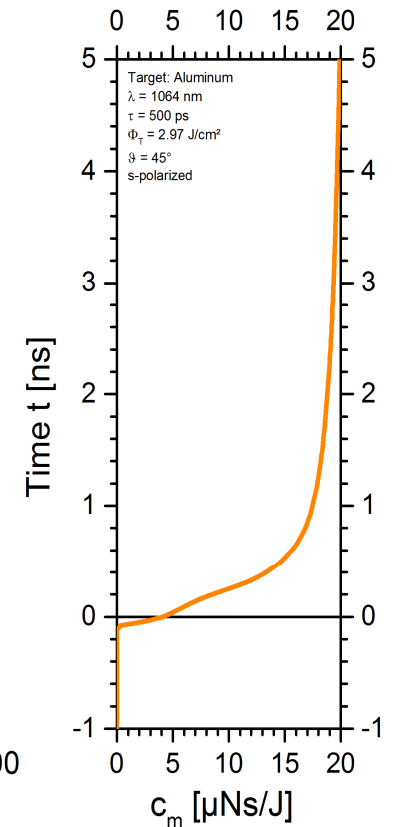


Laser Ablation

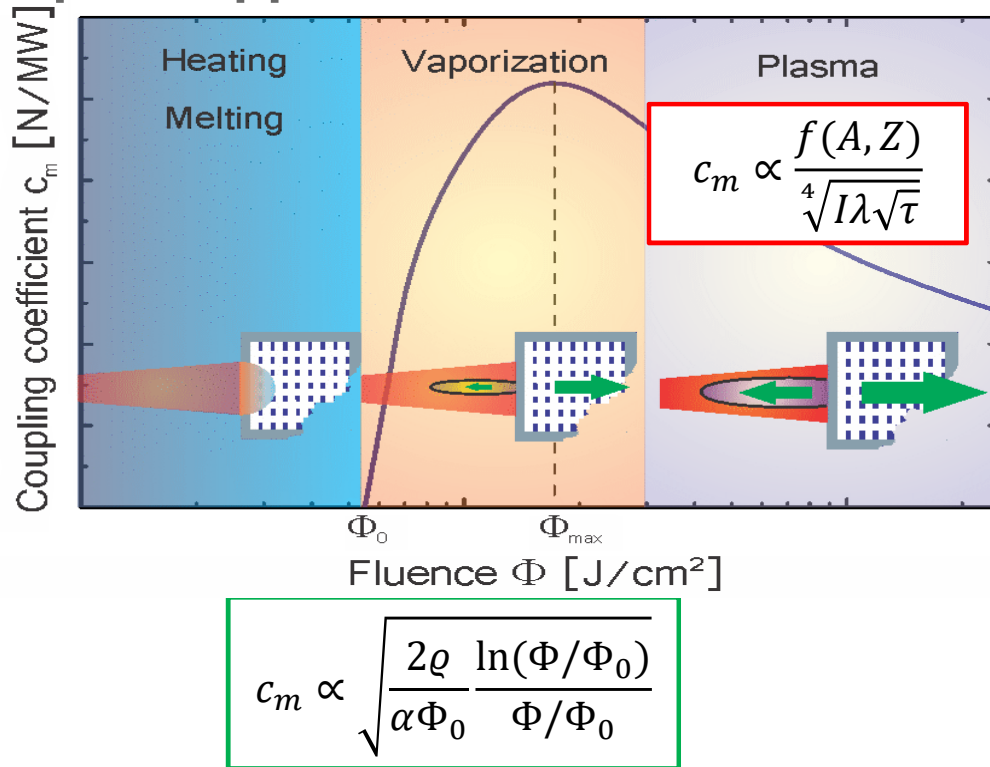
- Schmelzprozesse
- Verdampfung
- Ionisierung
- Plasmabildung
- Thermische Expansion
- Impulsübertrag



Hydrodynamische Simulationen mit Polly-2T (JIHT-RAS)

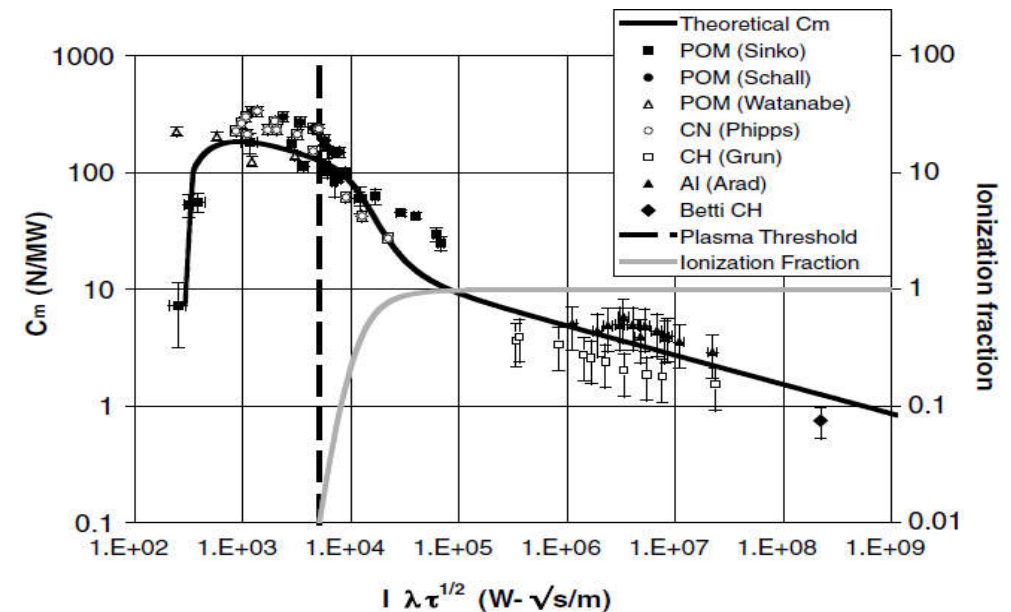


Impulskoppelkoeffizient



gültig für $\tau > 10 \dots 100 \text{ ps}$

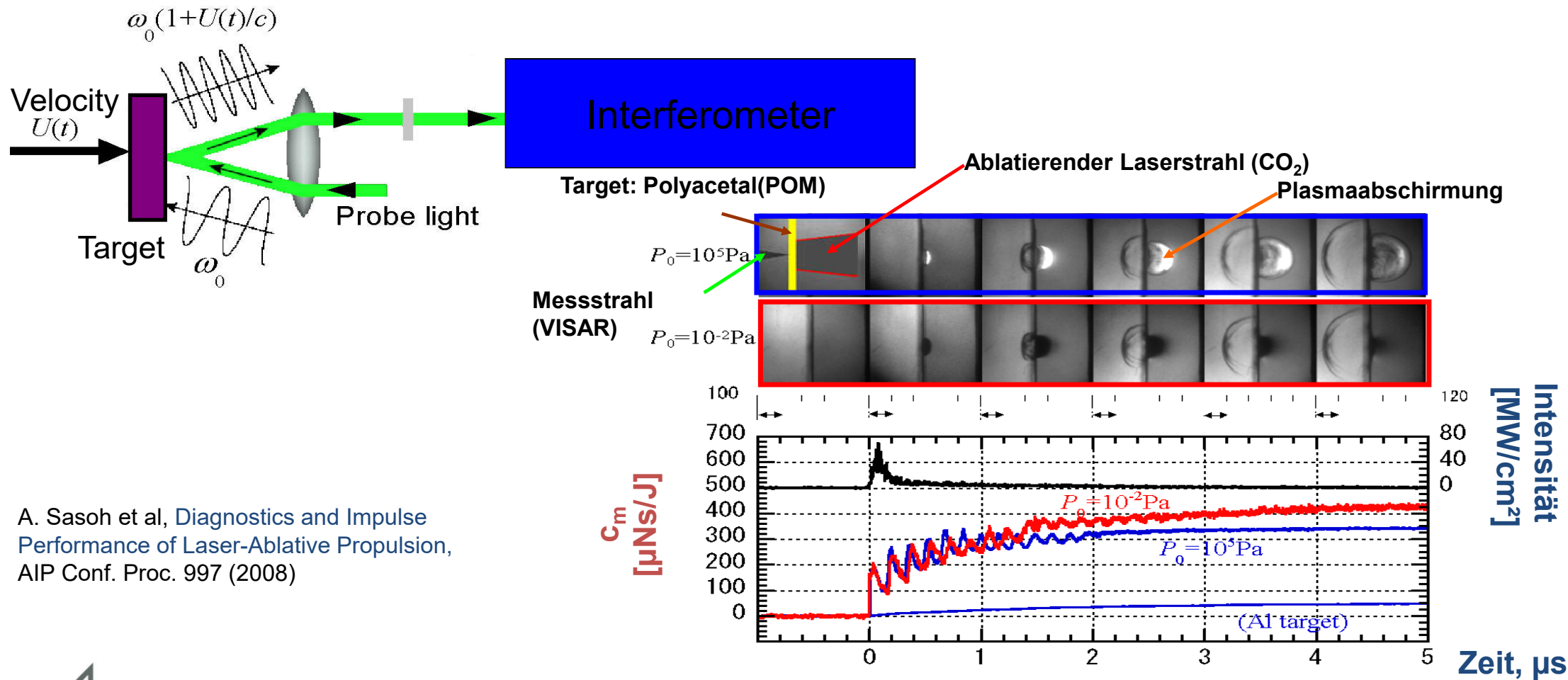
B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014



Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)



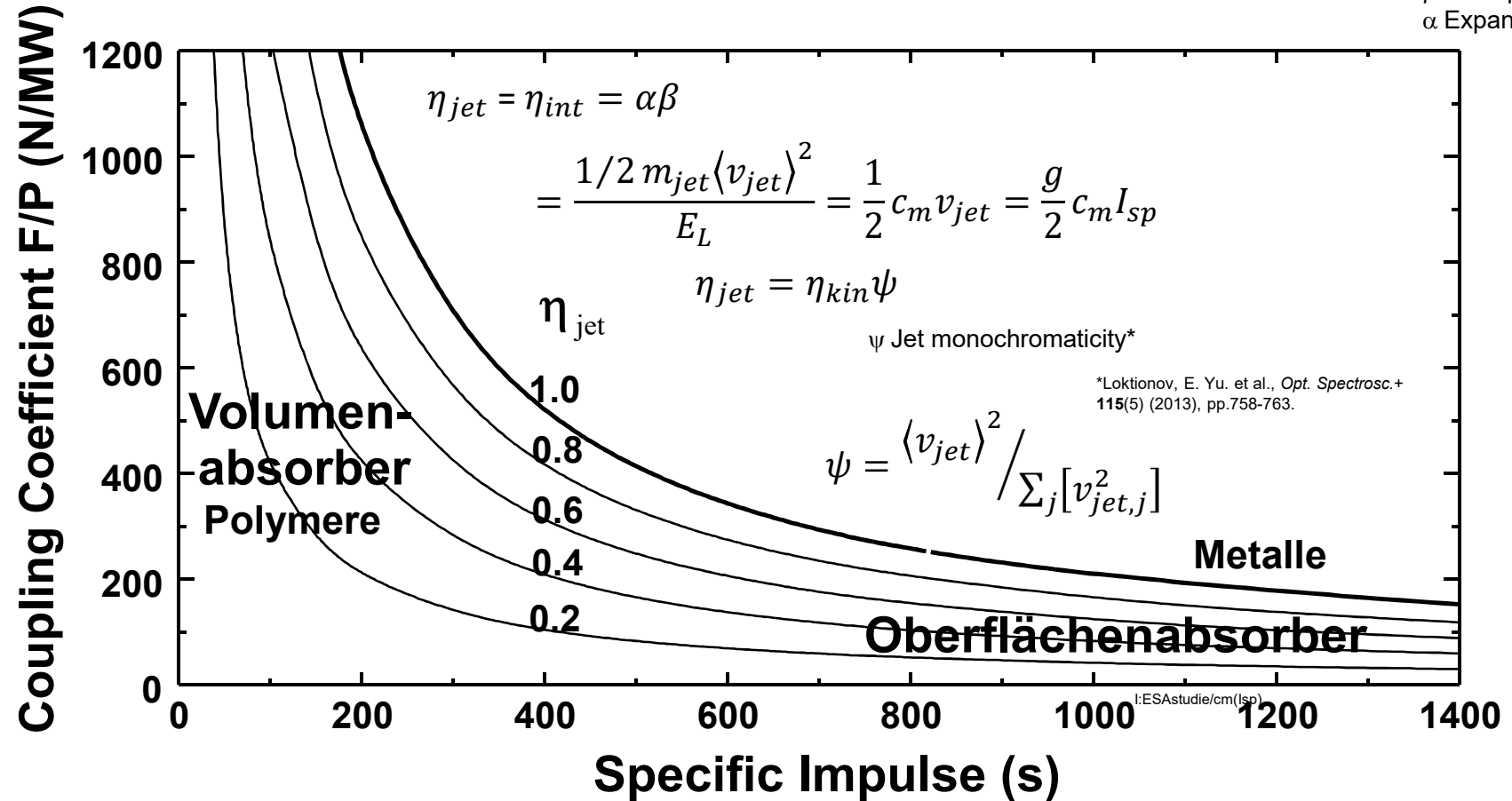
Impulsmessung



A. Sasoh et al, *Diagnostics and Impulse Performance of Laser-Ablative Propulsion*, AIP Conf. Proc. 997 (2008)

Innere Antriebseffizienz (Treibstoff-/Jeteffizienz)

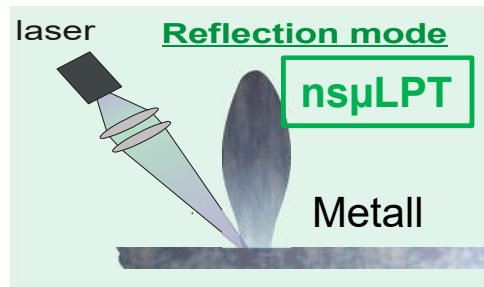
β Absorptionseffizienz
 α Expansionseffizienz



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)



Konzepte



Antrieb

Masse
[kg]Min.Impulsbit
[μNs] I_{sp}
[s] $C_{m,sys}$
[μN/W_{el}]T
[μN]

nsμLPT

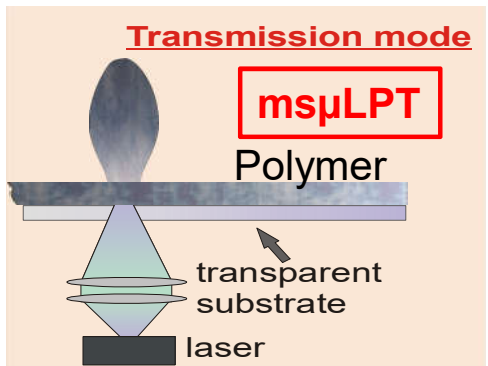
0,8

 $4 \cdot 10^{-5}$

3000

40

100



msμLPT

0,5

0,05

250

550

10000

Vergleich:

μPPT

1,0

2

1000

20

30

FEPP

8,7

1

9000

15

1400

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



T-Mode Micro Laser Plasma Thruster (ms μ LPT)

Getestete Treibstoffe:

PVC, sowie exotherme
Polymere (C-dotiert)

T 0,14 ... 0,29 mN (PVC:C)
2,8 ... 7,2 mN (EP:C I)

c_m 60 ... 120 μ N/W (PVC:C)
1170 ... 3000 μ N/W (EP:C)

I_{sp} 650 ... 750 s (PVC:C)
160 ... 540 s (EP:C)

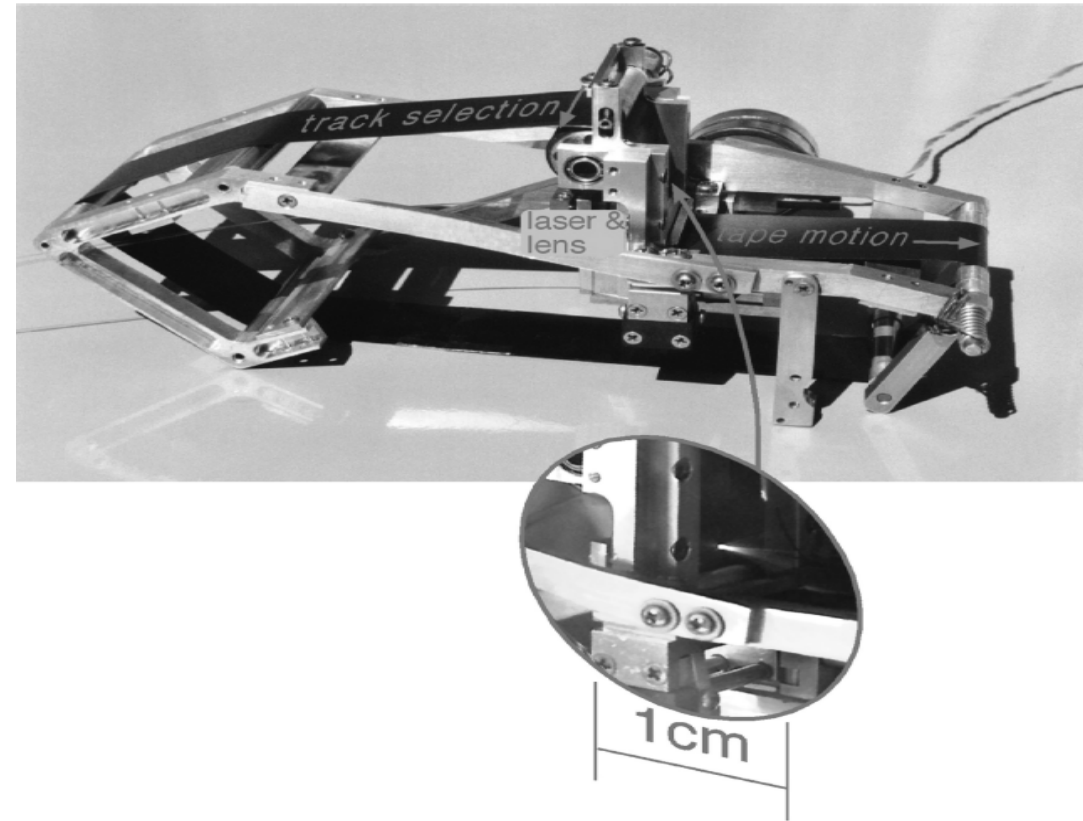
Lasertyp: Diodenlaser

τ 2 ms

λ 920 nm

f_{rep} 80 Hz

E_L 30 mJ



Phipps et al, Micropropulsion using a Laser Ablation Jet, J. Prop. Pow. **20**(6), 1000-1011 (2004)
Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



R-Mode Micro Laser Plasma Thruster (nsμLPT)

Getestete Treibstoffe:

Aluminium, Gold

T 0,47 ... 0,63 μN (Au)
0,94 ... 1,88 μN (Al)

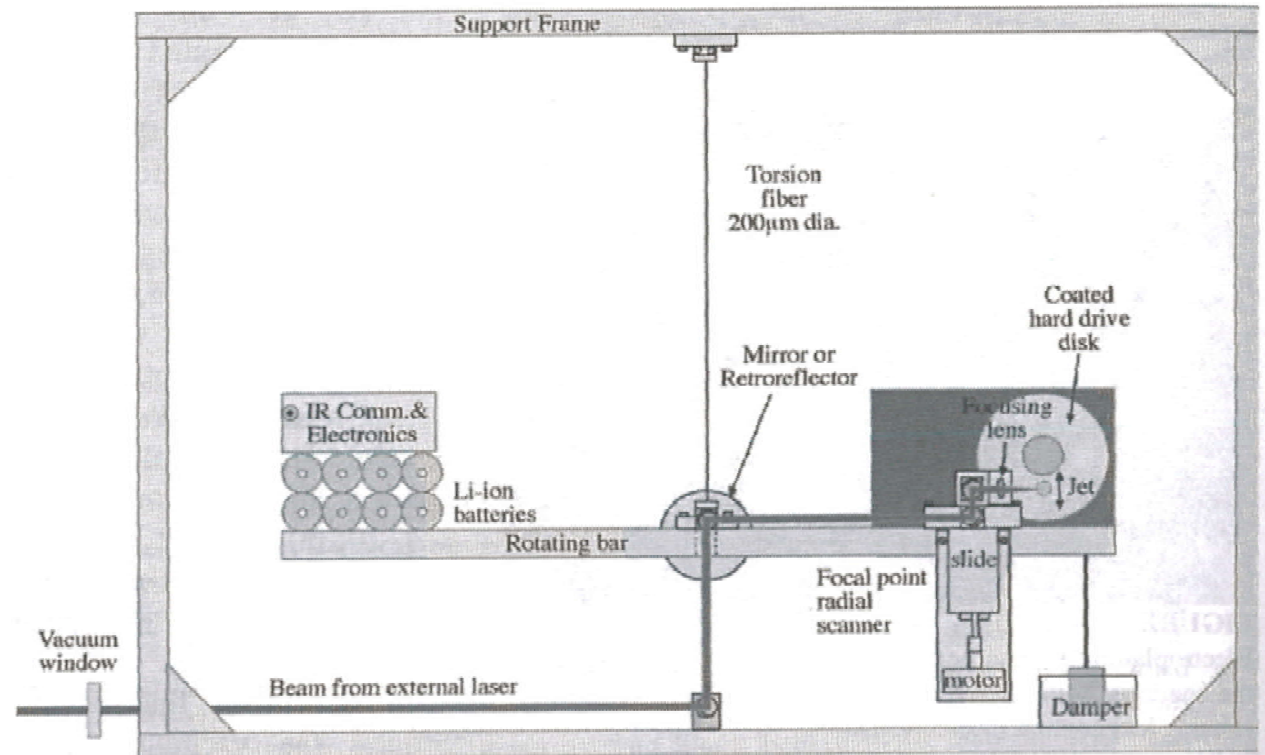
c_m 7,2 ... 68 $\mu\text{N/W}$ (Au)
32 ... 111 $\mu\text{N/W}$ (Al)

I_{sp} 3664 ... 7905 s (Au)
822 ... 6610 s (Al)

Lasertyp:

Diodengepumpter Nd:YAG-Laser

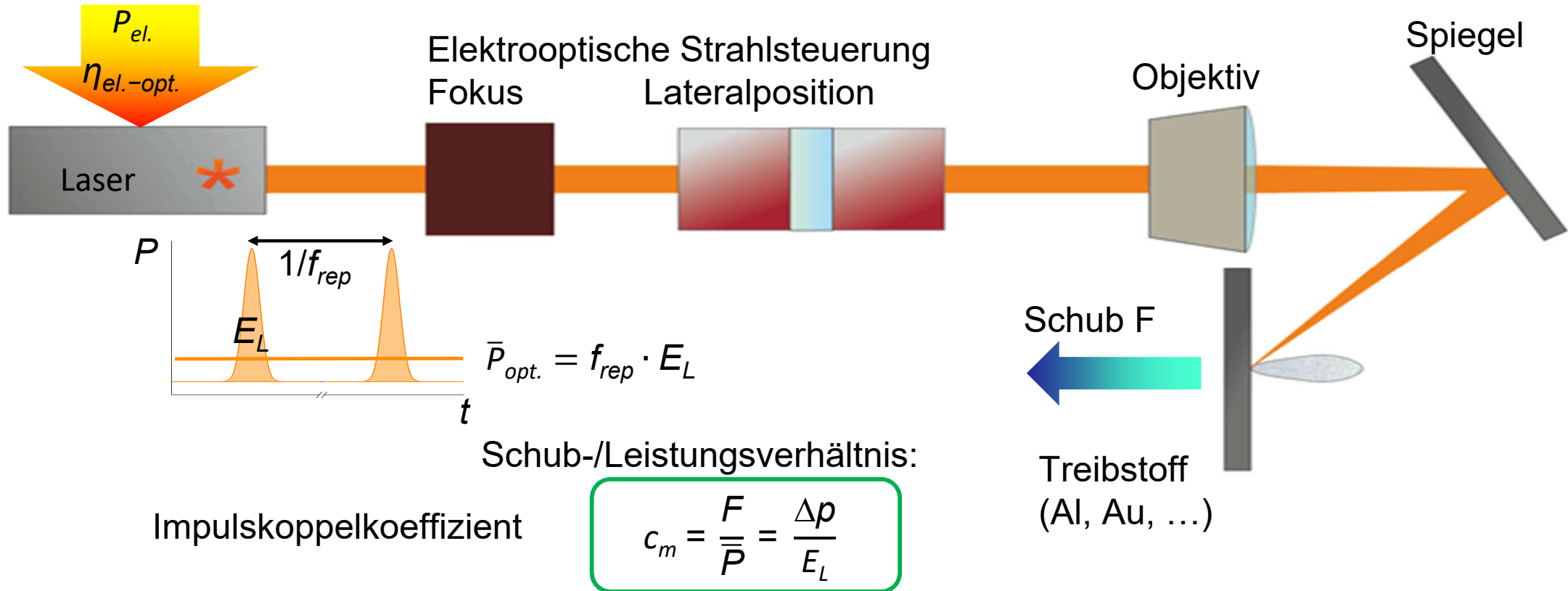
τ 5 ns
 λ 1064 nm
 f_{rep} 10 Hz
 E_L 1 ... 20 mJ



Phipps et al, A ns-Pulse Laser Microthruster,
AIP Conf. Proc. **830**, 235-246 (2006)



Trägheitsfreies Antriebskonzept



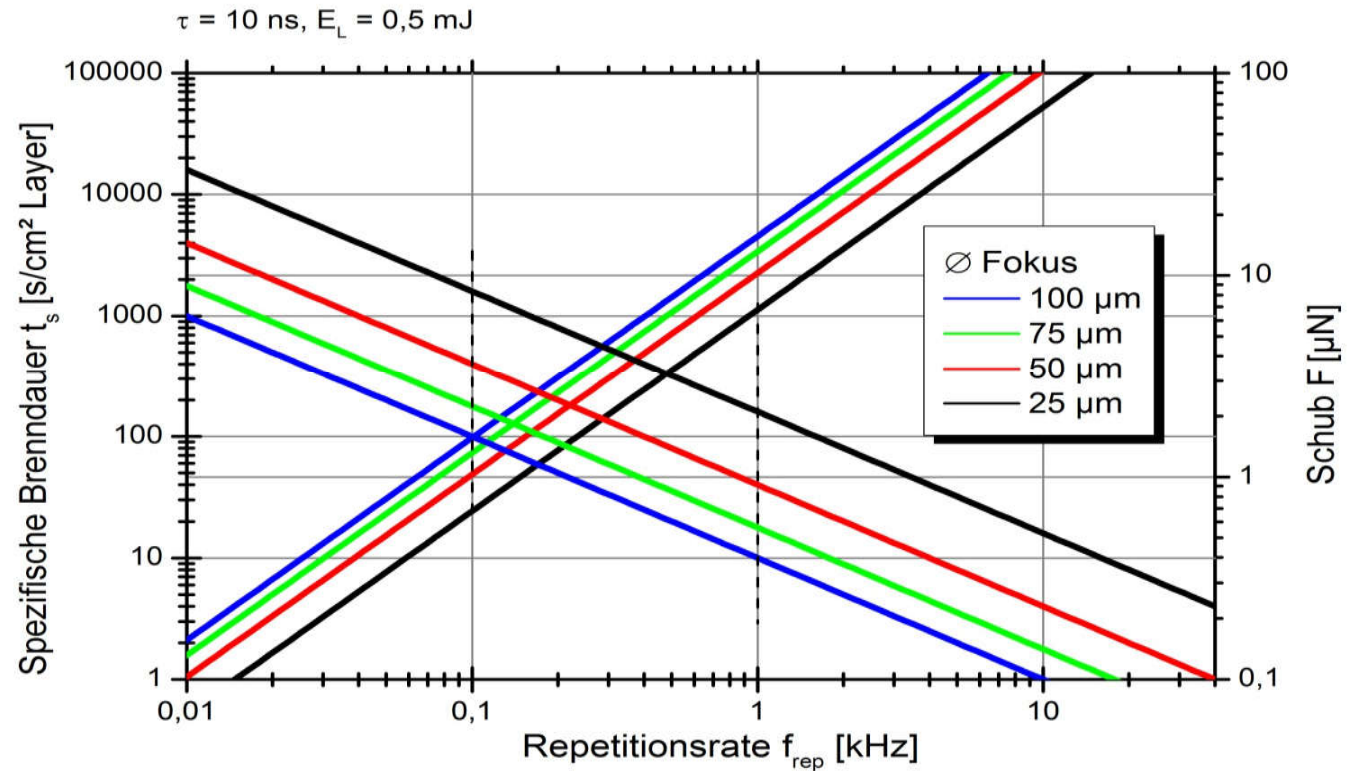
Eckel et al, *Tailoring Laser Propulsion for Future Applications in Space*,
High Power Laser Ablation 2010, AIP Conf. Proc. **1278**, 677-688 (2010)



Schubcharakteristik



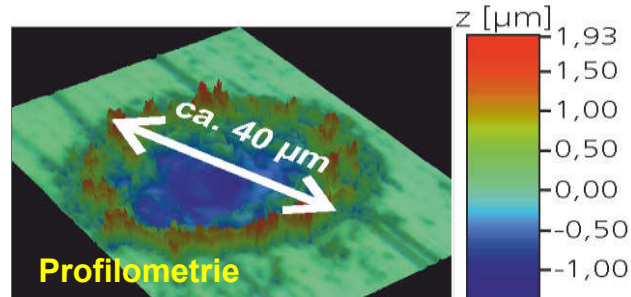
Stablaser
 $\bar{P}_{max} = 35 \text{ W}$



Modellrechnung mit experimentellen Werten aus
 Phipps et al, Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers, J.
 Appl. Phys. 64(3), 1083-1096 (1988)

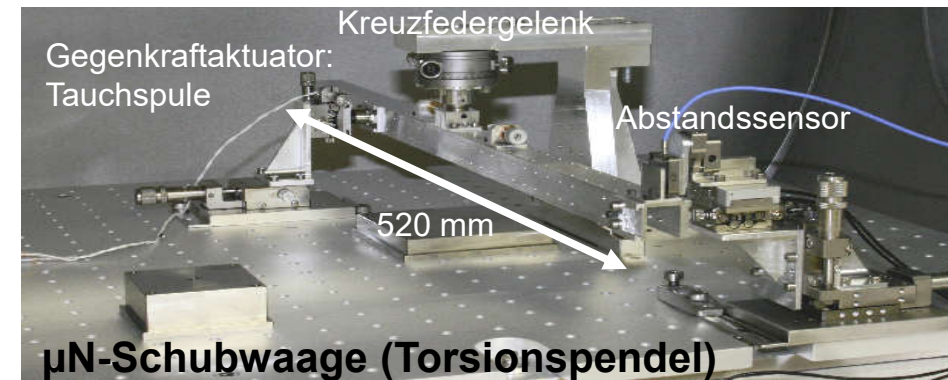
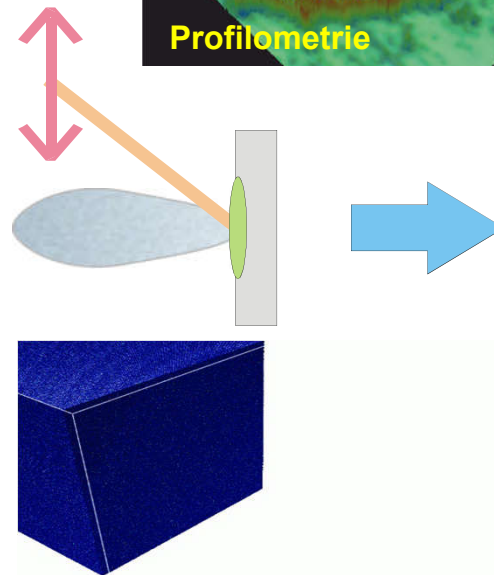
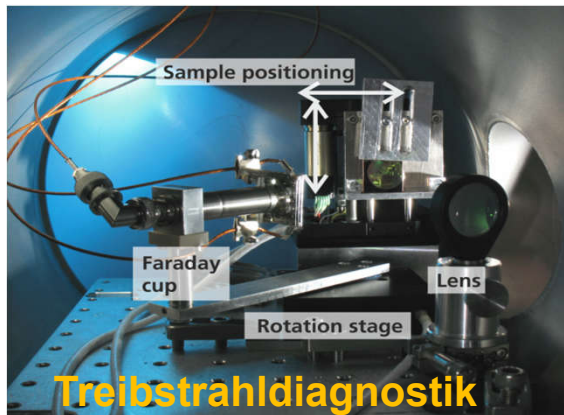


Forschungsgebiete



Kenngroößen:

- Impulsübertrag
- Ablatierte Masse
- Oberflächenqualität
- Jet: Geschwindigkeitsverteilung
 - Divergenz



Optimierungsparameter:

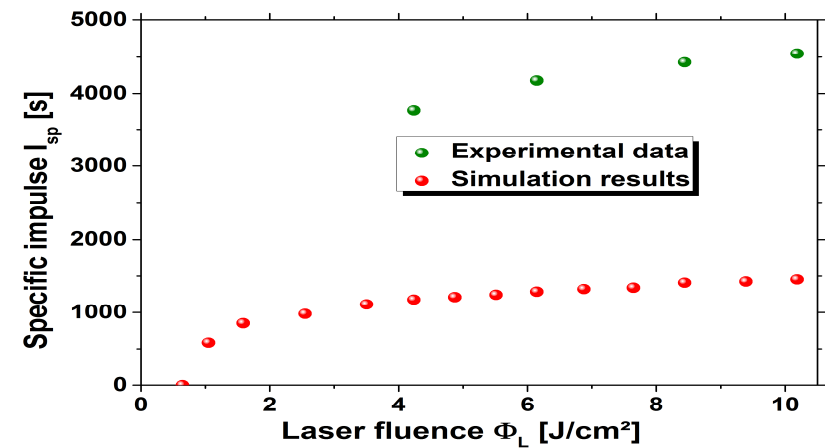
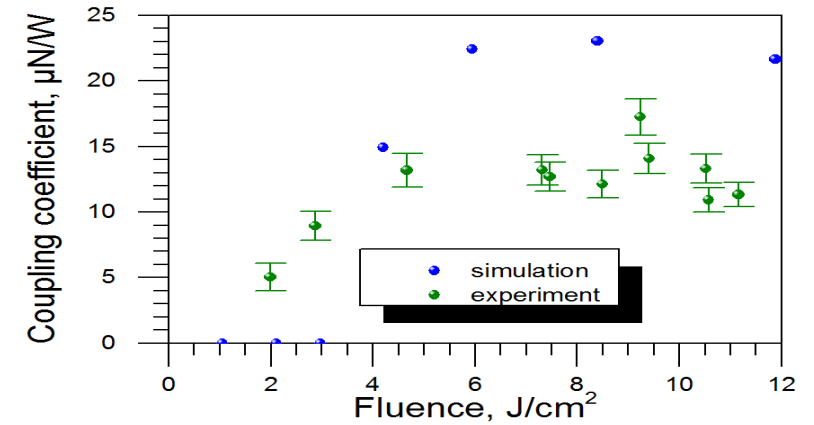
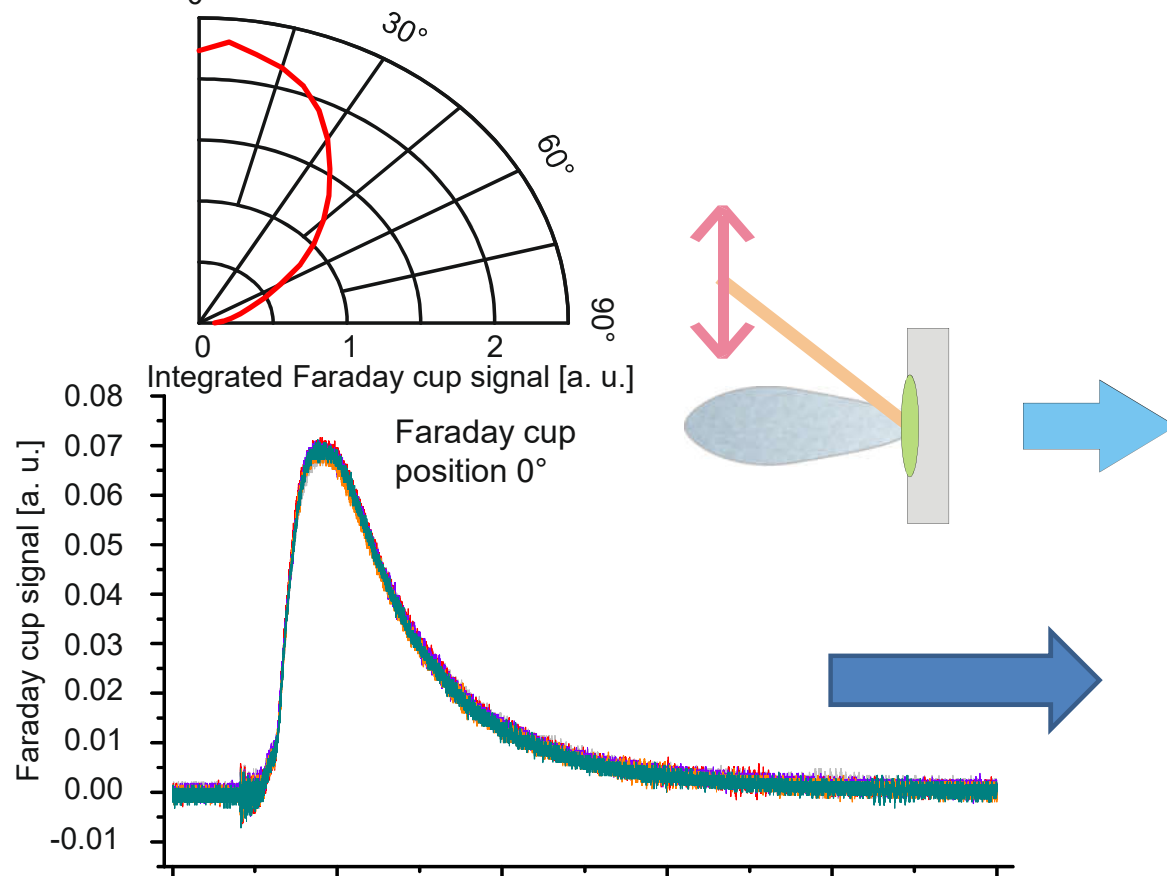
- Pulsdauer, -profil
- Wellenlänge
- Ablationsschema
- Material

Ablationsprozess:

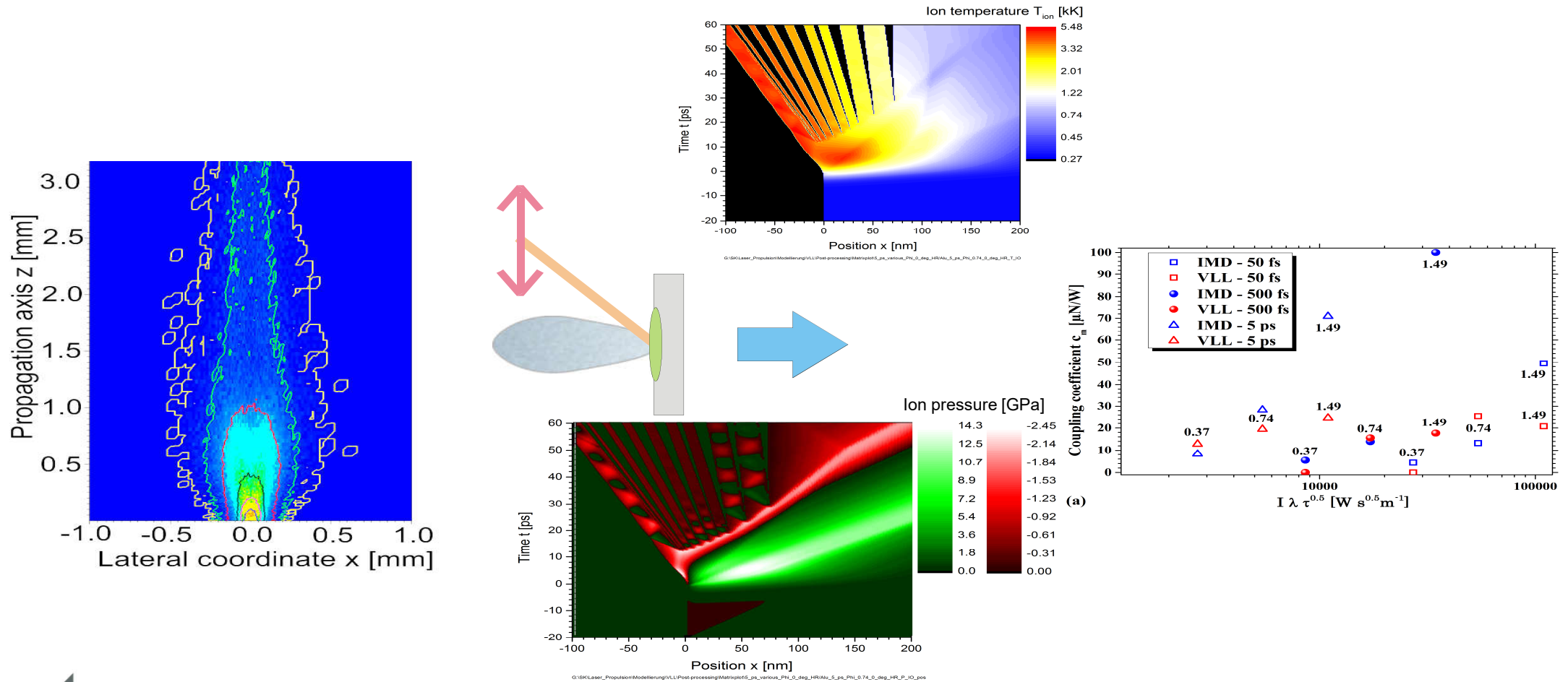
Molekulardynamik (IMD) / Hydrodynamik (Polly-2T)
Plasmajet: DSMC-PIC-Simulation (PICLas)



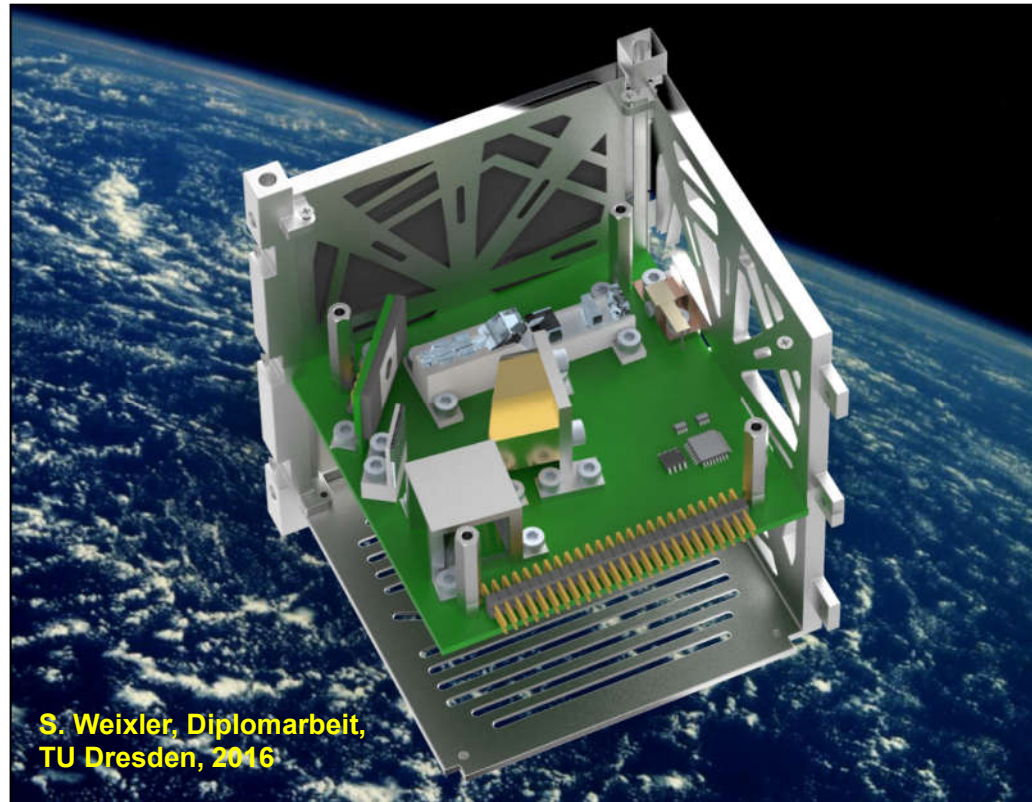
Experimente – Ablation von Aluminium



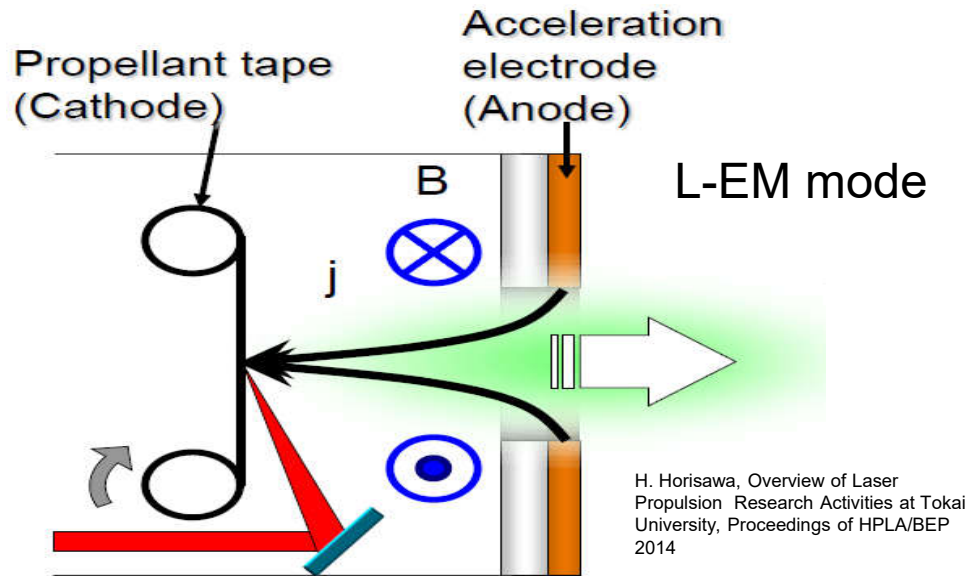
Simulationen – Ablation von Aluminium



Demonstrator-Entwicklung für Cubesat



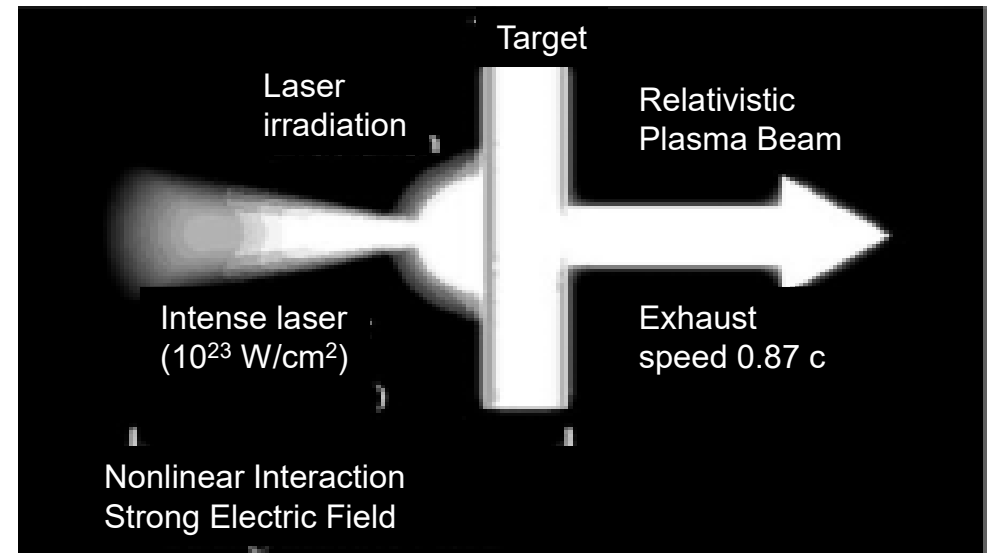
Antriebskonzepte



elektrostatisch (L-ES mode)

+ *el. Entladung: elektrothermisch (LT mode)*

+ *große Stromstärken:*
elektromagnetisch durch Selbstinduktion
(L-EM mode)



relativistisch

Pulsdauer: 10 fs ... 5 ps

Schichtdicke: ~ 100 nm

Coulomb-Explosion

- Erzeugung hochenergetischer Elektronen
- Aufbau eines elektrischen Feldes
- Expansion der Ionen in Plasmastrahl

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

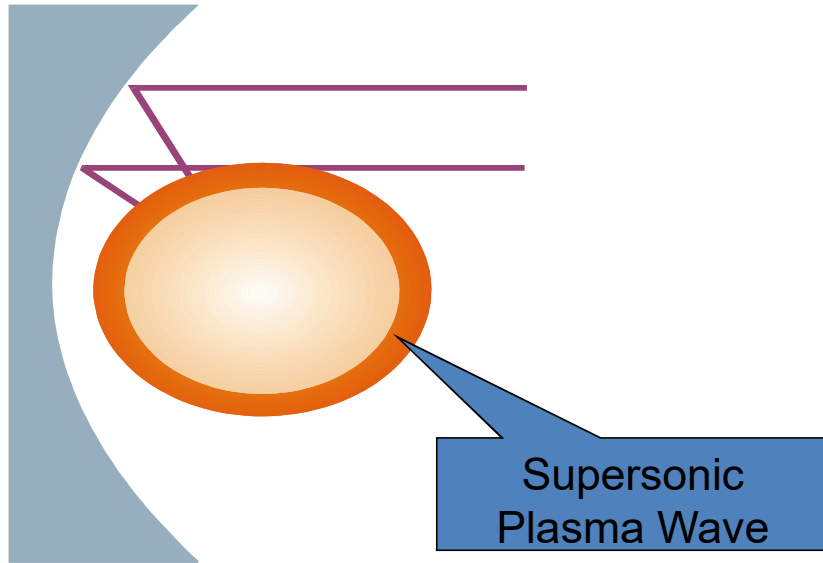
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > **3.3 Laser Lightcraft**
 - > 3.3.1 Detonationsprozesse
 - > 3.3.2 Lightcraft Technology Demonstrator
 - > 3.3.3 Parabolisches Lightcraft (DLR)
 - > 3.3.4 Russland - ASLPE
 - > 3.3.5 Earth-based LEO launch
- > 3.4 unkooperative Objekte

4 Zusammenfassung



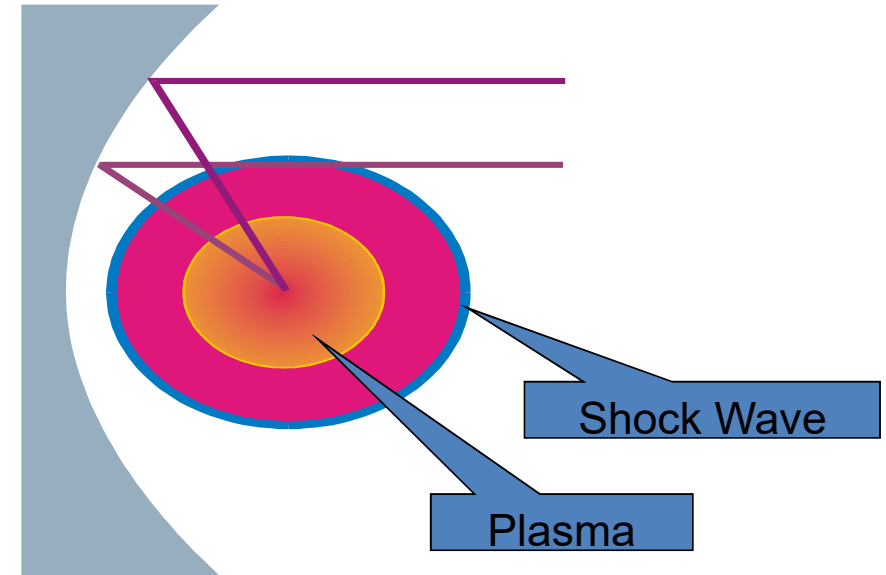
Lasergestützte Absorptionswellen



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \rightarrow \omega_{Laser}$$

Laser Supported Detonation Wave (LSD)

$$I > 10^7 \text{ W/cm}^2$$



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \ll \omega_{Laser}$$

Laser Supported Combustion Wave (LSC)

$$I < 10^7 \text{ W/cm}^2$$



Detonation ablativer Treibstoffe

Interne Effizienz für reine Ablation (s.o.):

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1}{2} c_m \cdot v_{\text{jet}} = \alpha \beta$$

β Absorptionseffizienz

α Expansionseffizienz

Interne Effizienz für exotherme Reaktionen:

$$\eta_{\text{int}} = \alpha (\beta + mQ / E_L)$$

Q Spezifische Reaktionswärme
 E_L Laserpulsenergie

mit $Q = Q_{\text{det}} + N_{\text{db}} Q_{\text{db}}$

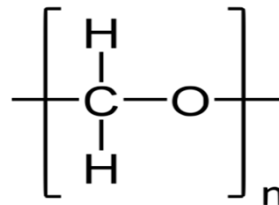
Q_{det} Spezifische Detonationsenergie

Q_{db} Spez. Energie für
verzögerte Verbrennung

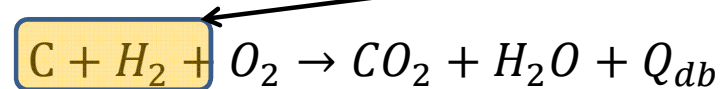
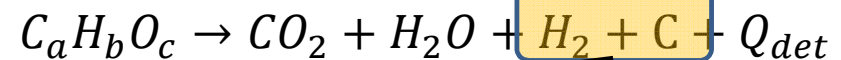
Bsp: Polyoxymethylen
(Delrin, POM)

$$Q_{\text{det}} = 2,69 \text{ J/mg}$$

$$Q_{\text{db}} = 16,1 \text{ J/mg}$$



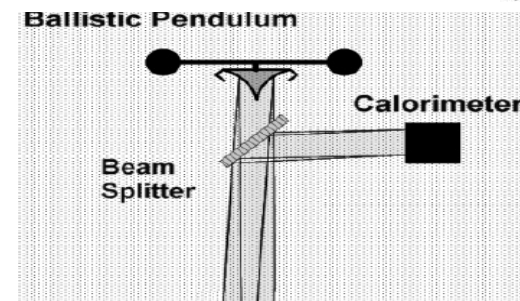
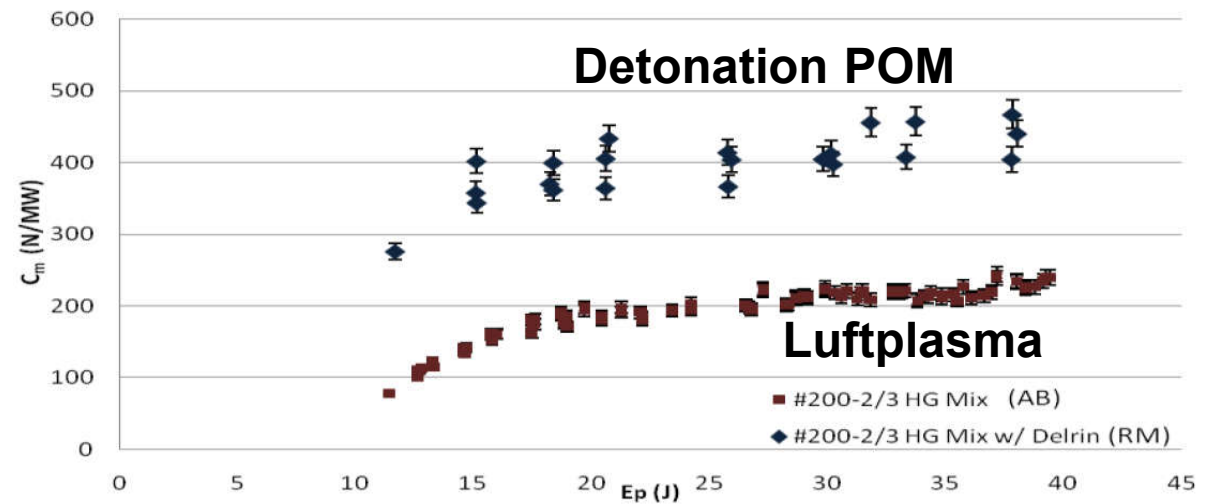
Beispiel: CHO-Polymere



A.A. Ageichik et al, Detonation of CHO Working Substances in a
Laser Jet Engine,
Technical Physics **54(3)**, 402 – 409 (2009)



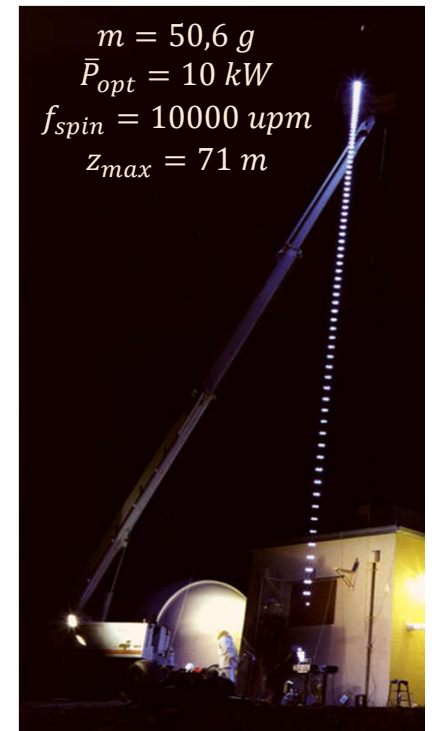
Pendelexperiment



D.A. Kenoyer et al, Axial Impulse
Generation of Lightcraft Engines with
~ 1 μ s Pulsed TEA CO₂ Laser,
AIP Conf. Proc. **1402**, 82 – 92 (2011)



Weltrekordflug

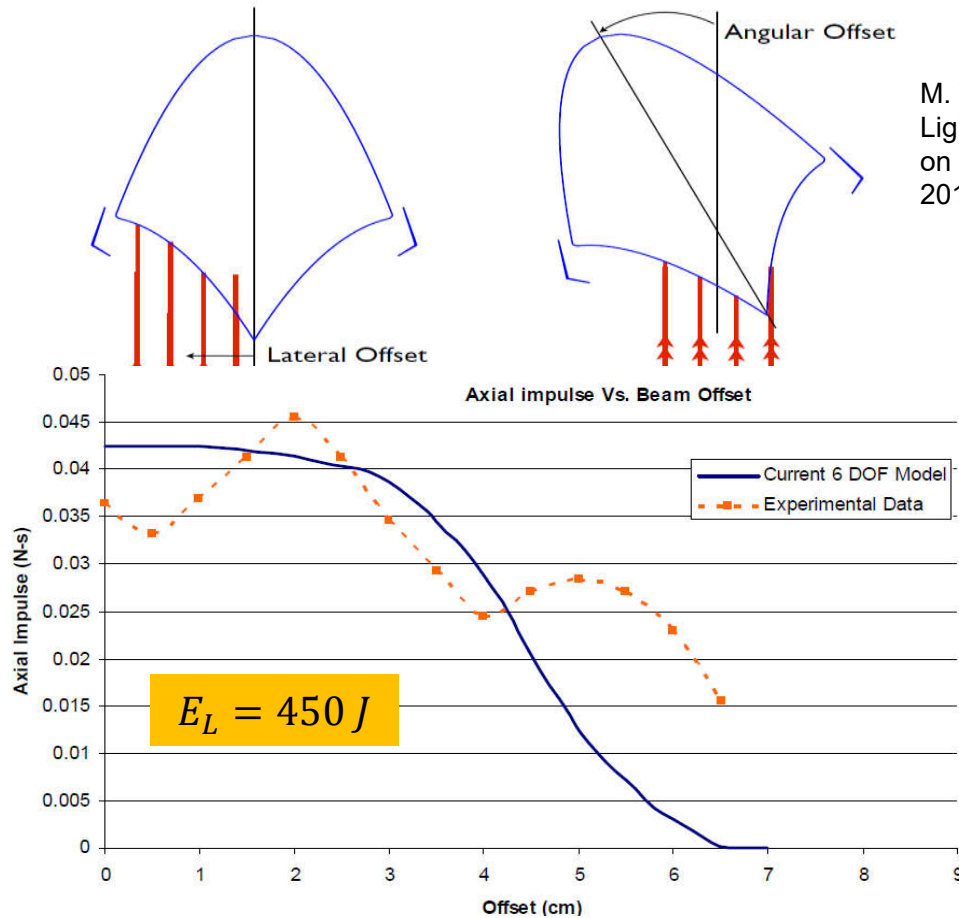


$$\begin{aligned} m &= 50,6 \text{ g} \\ \bar{P}_{opt} &= 10 \text{ kW} \\ f_{spin} &= 10000 \text{ upm} \\ z_{max} &= 71 \text{ m} \end{aligned}$$

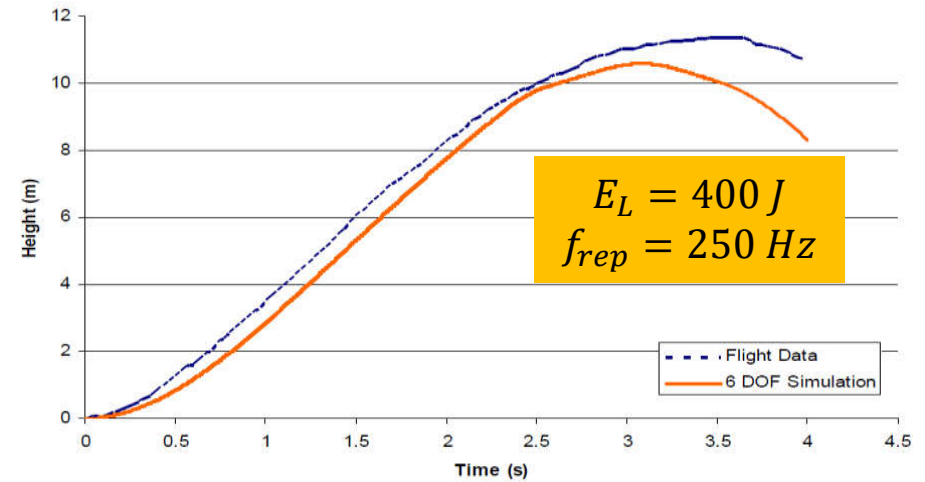
L.N. Myrabo, World Record
Flights of Beam-Riding Rocket
Lightcraft: Demonstration of
„Disruptive Propulsion
Technology,
AIAA Paper 2001-3798



Flugbahnanalyse



M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014

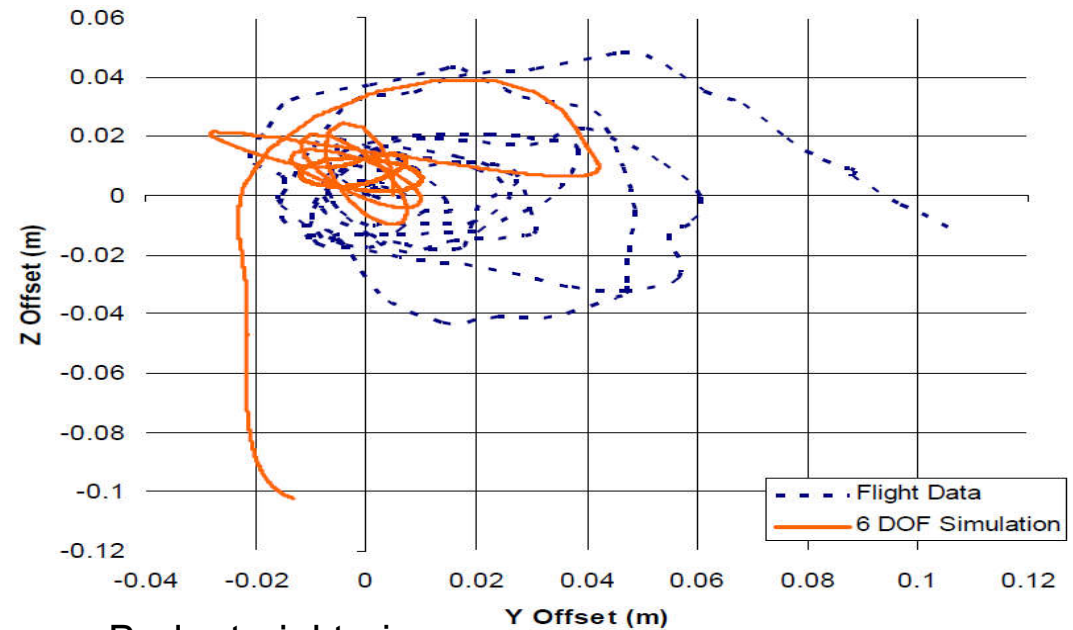
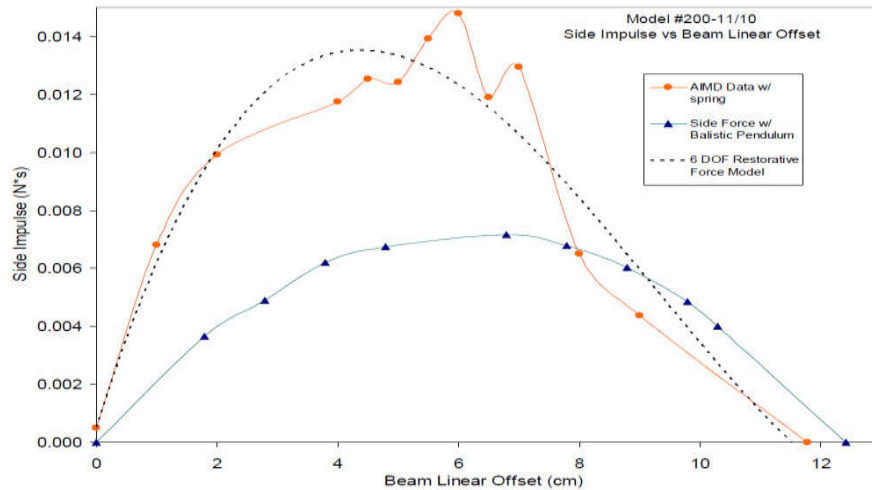


Simulationsrechnung mit aerodyn. Kräften

D.A. Kenoyer et al, Validation and Calibration of a 6-DOF Laser Propelled Lightcraft Flight Dynamics Model vs. Experimental Data, AIP Conf. Proc. **997**, 325 – 337 (2008)



Lateralbewegung



Bodentrajektorien

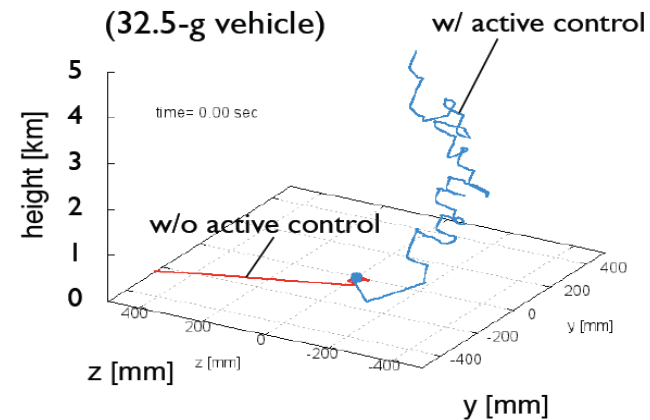
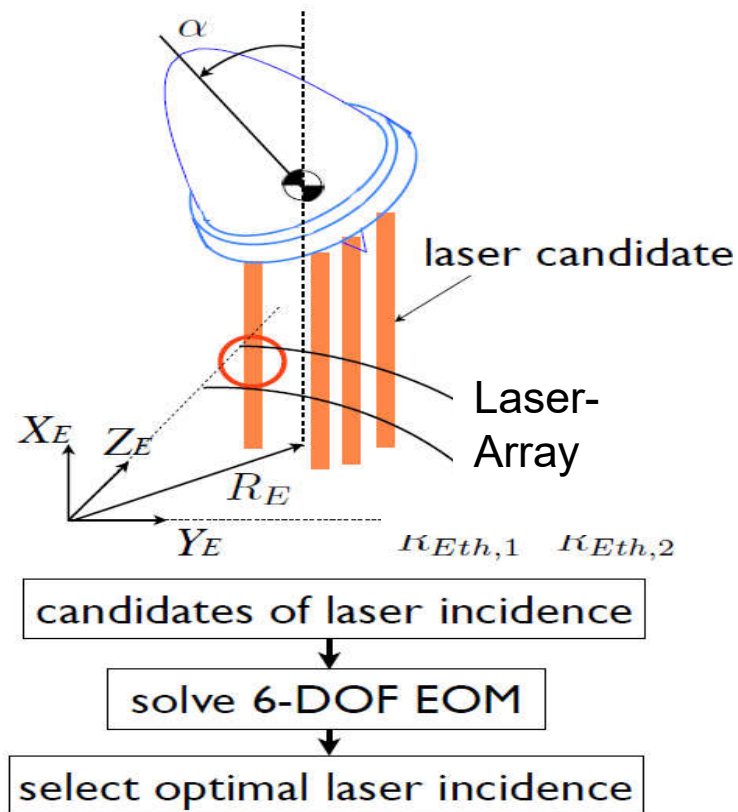
D.A. Kenoyer et al, ebd.

Angular Impulse Measurement Device (AIMD):

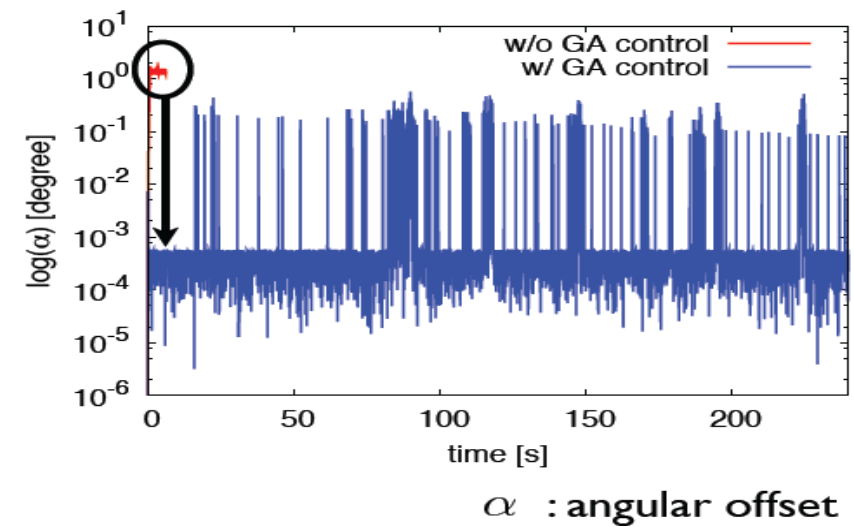
- Drehimpuls auf Rotor bei verschiedenen Trägheitsmomenten
- ↓
- Drehimpuls, Lateralimpuls auf Lightcraft



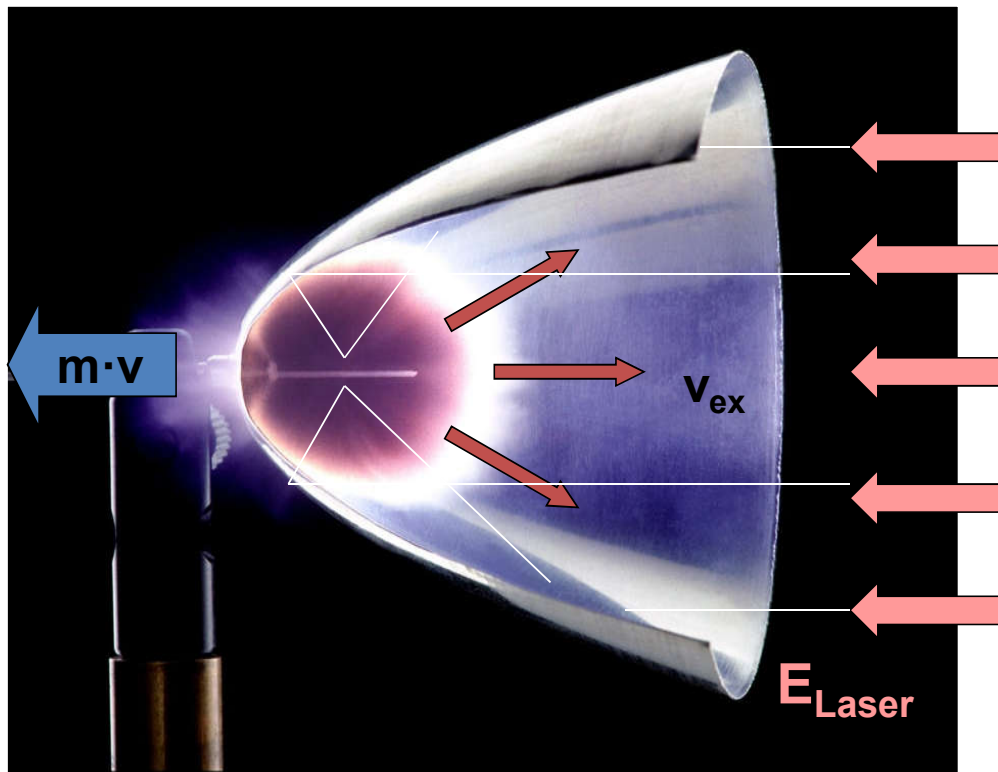
Flugstabilisierung



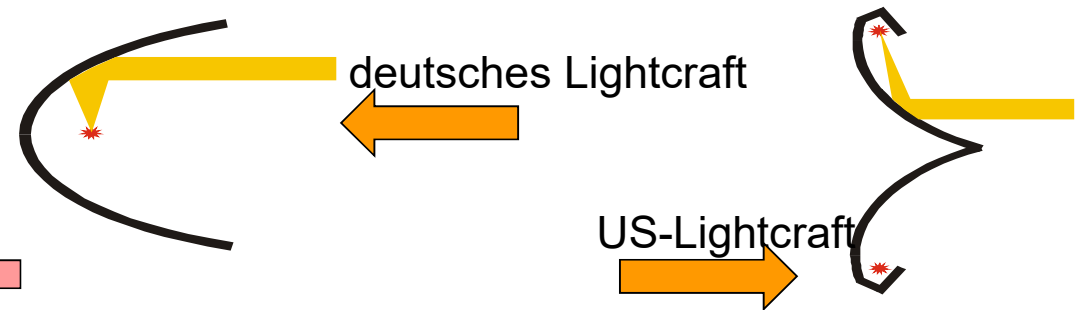
M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014



Funktionsprinzip



Air Plasma

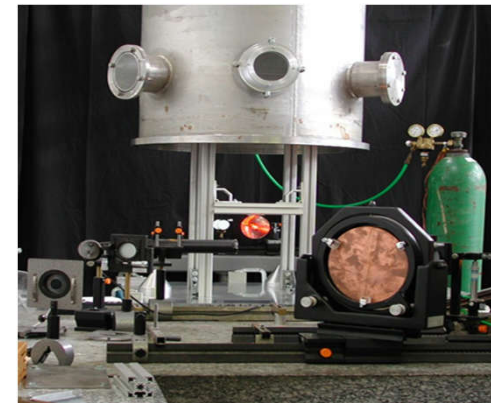
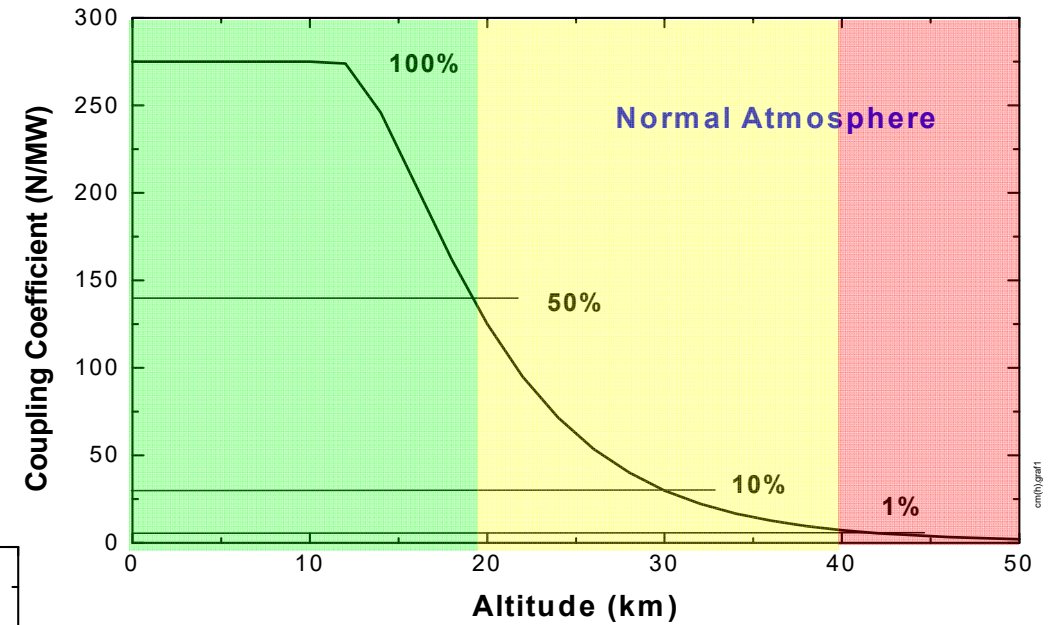
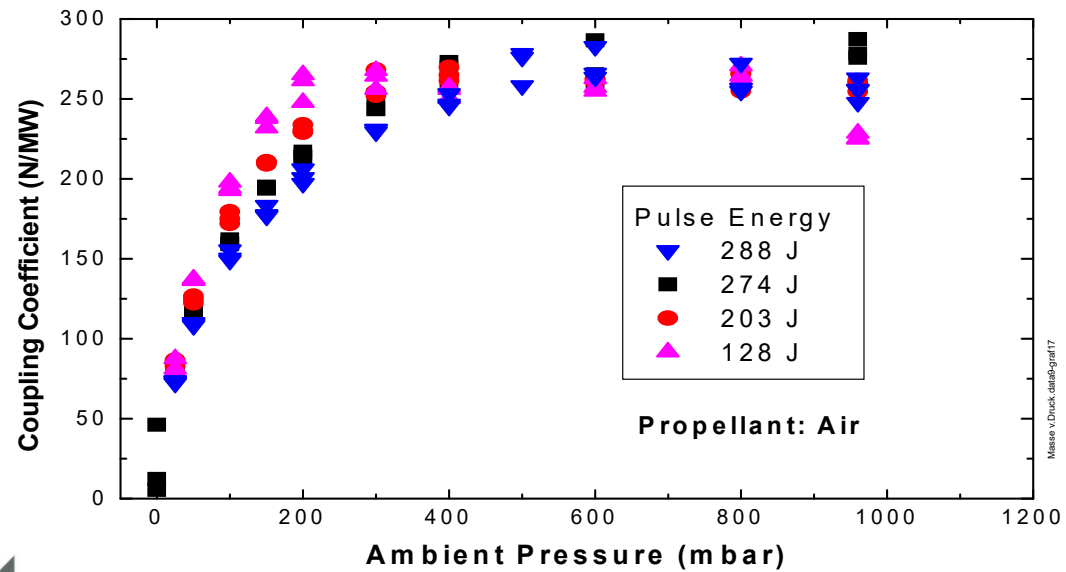


Laserpulsenergie $E_L = 20 \dots 200 \text{ J}$
Pulsdauer $\sim 8 \dots 12 \mu\text{s}$

- ⇒ **Fokusintensität $> 10^7 \text{ W/cm}^2$**
- ⇒ **Plasmazündung**
- ⇒ **Schnell expandierendes Plasma**
- ⇒ **Impulsübertrag durch Druckanstieg und ausströmende Materie (Treibstoff/Luft)**

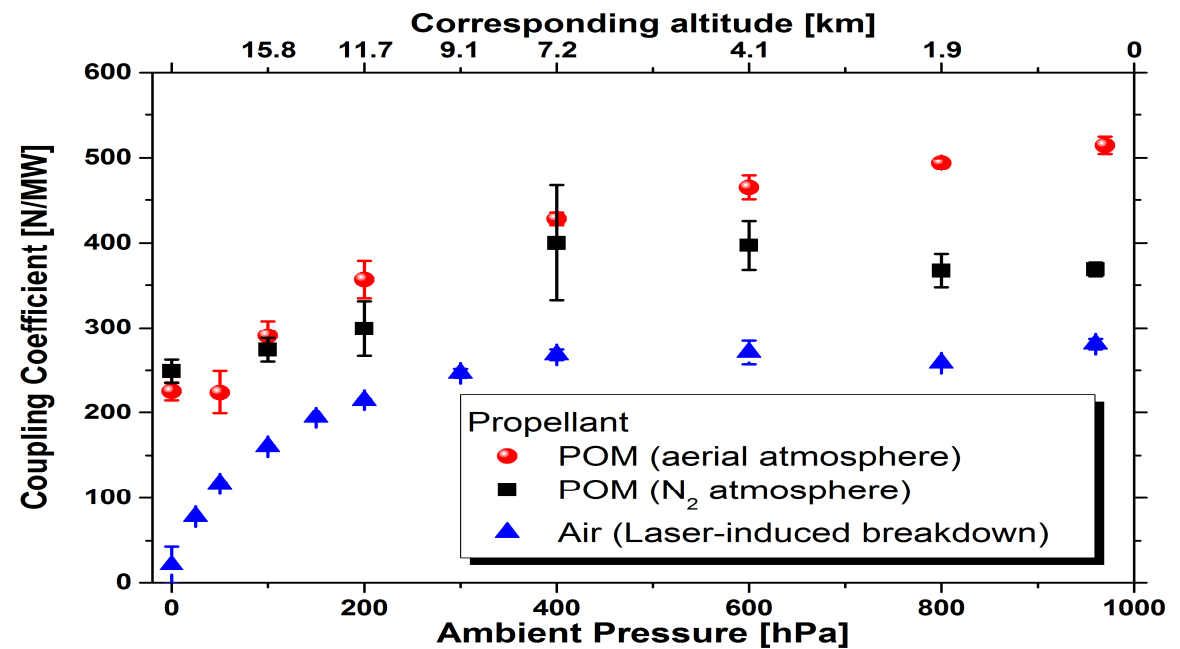
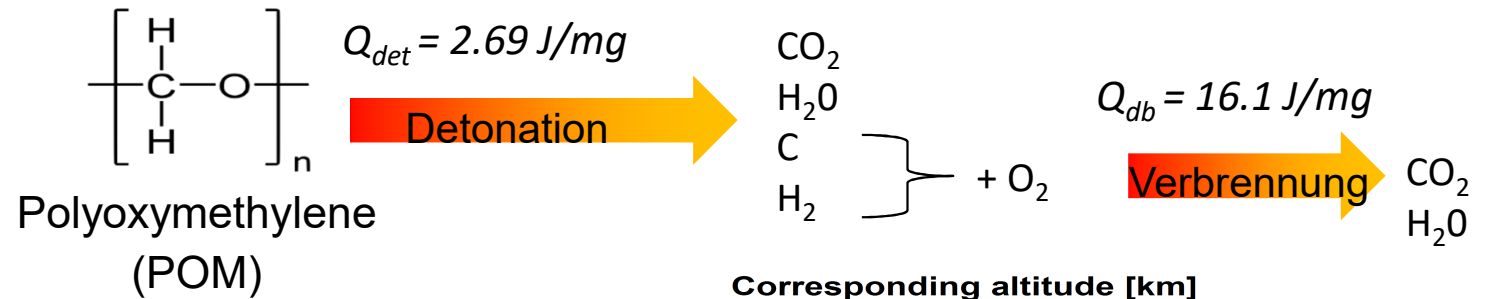
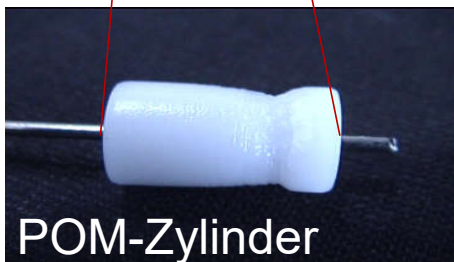
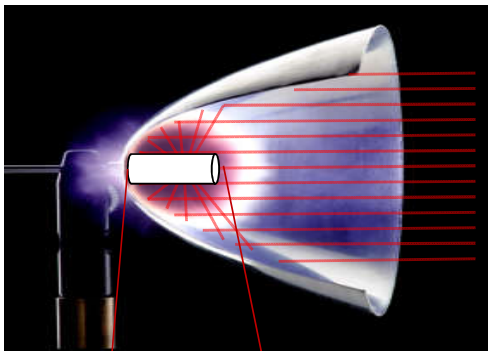


Höhensimulation – ohne Treibstoff

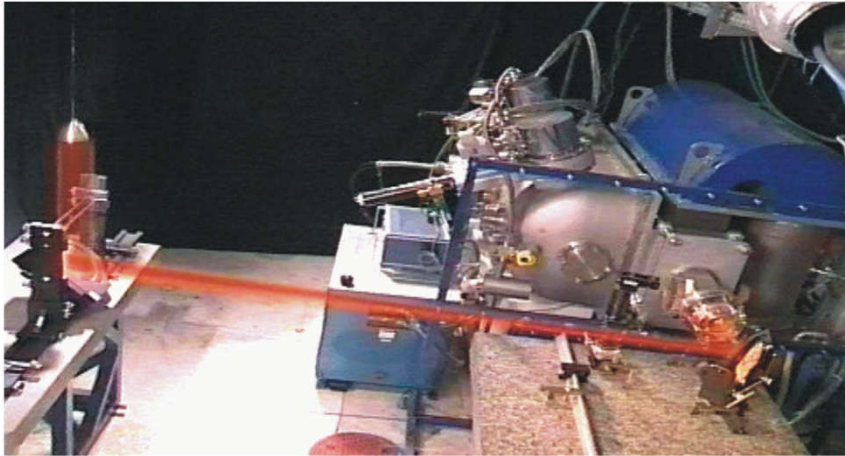


Ballistisches Pendel
im Vakuumtank

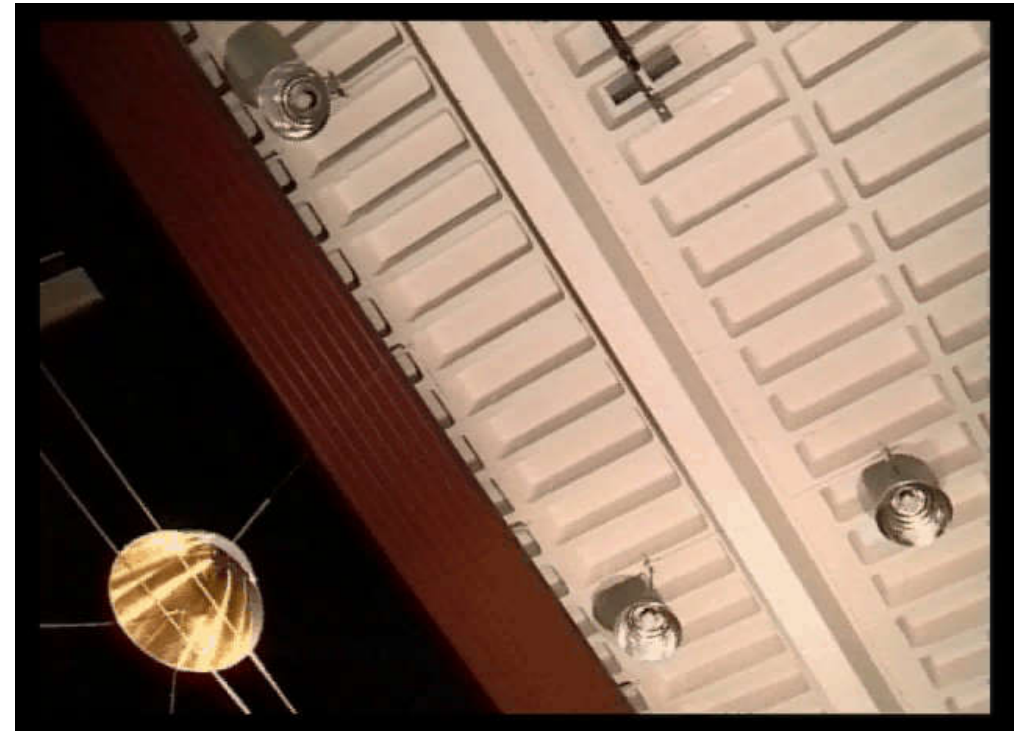
Verwendung von Treibstoff



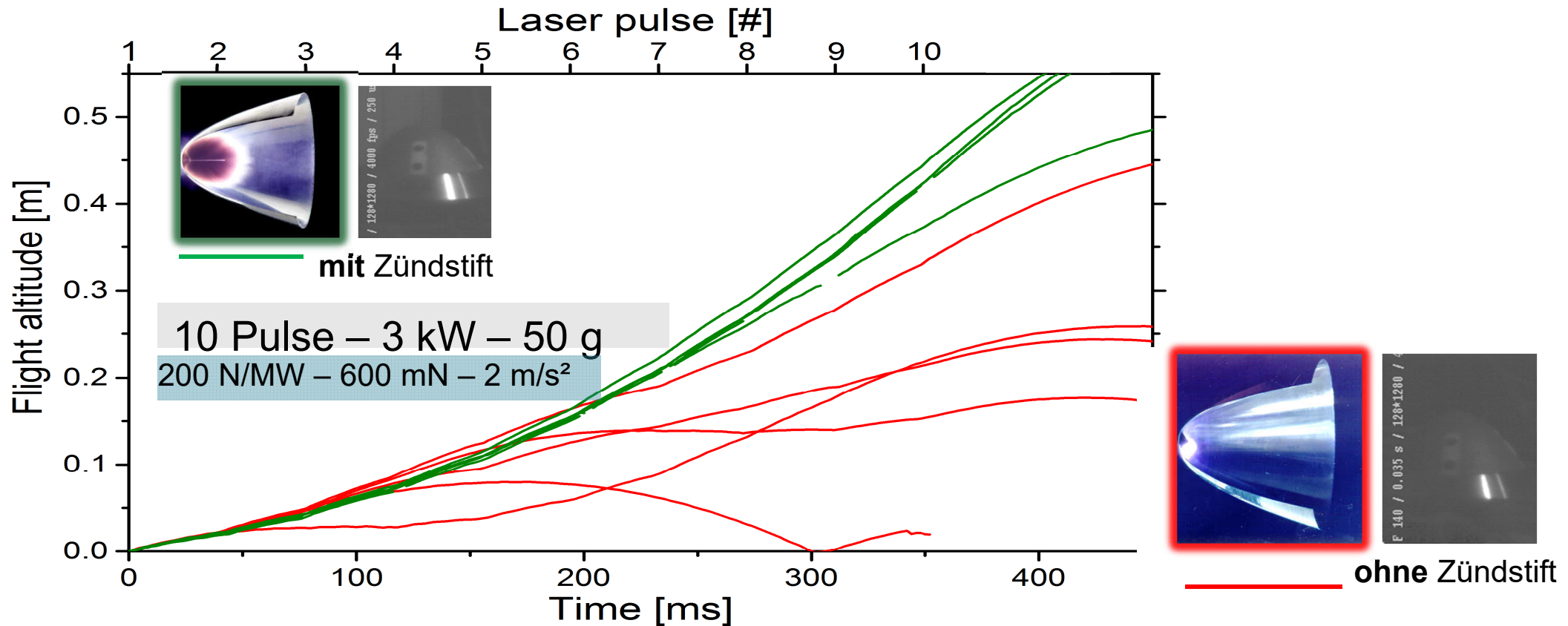
Drahtgeführte Flugexperimente



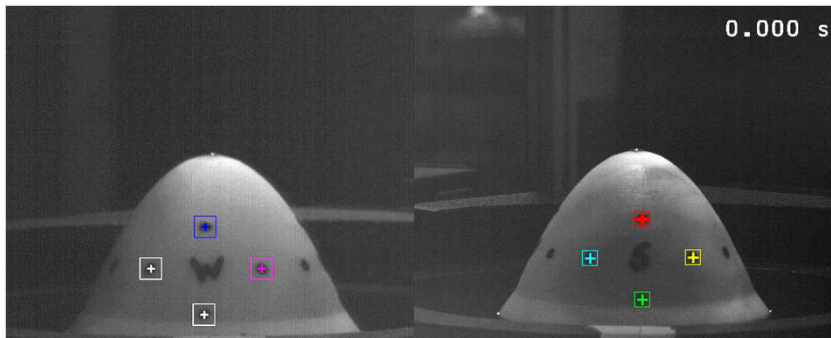
- Flughöhe 6 m
- 8 Pulse, 80 J, 15 Hz
- Beschleunigung $\sim 1g$
- $m = 22 \dots 55 \text{ g}$
- Schub $T = 1,05 \text{ N}$
- Ohne Treibstoff
- drahtgeführt



Freiflugexperimente ohne Spin



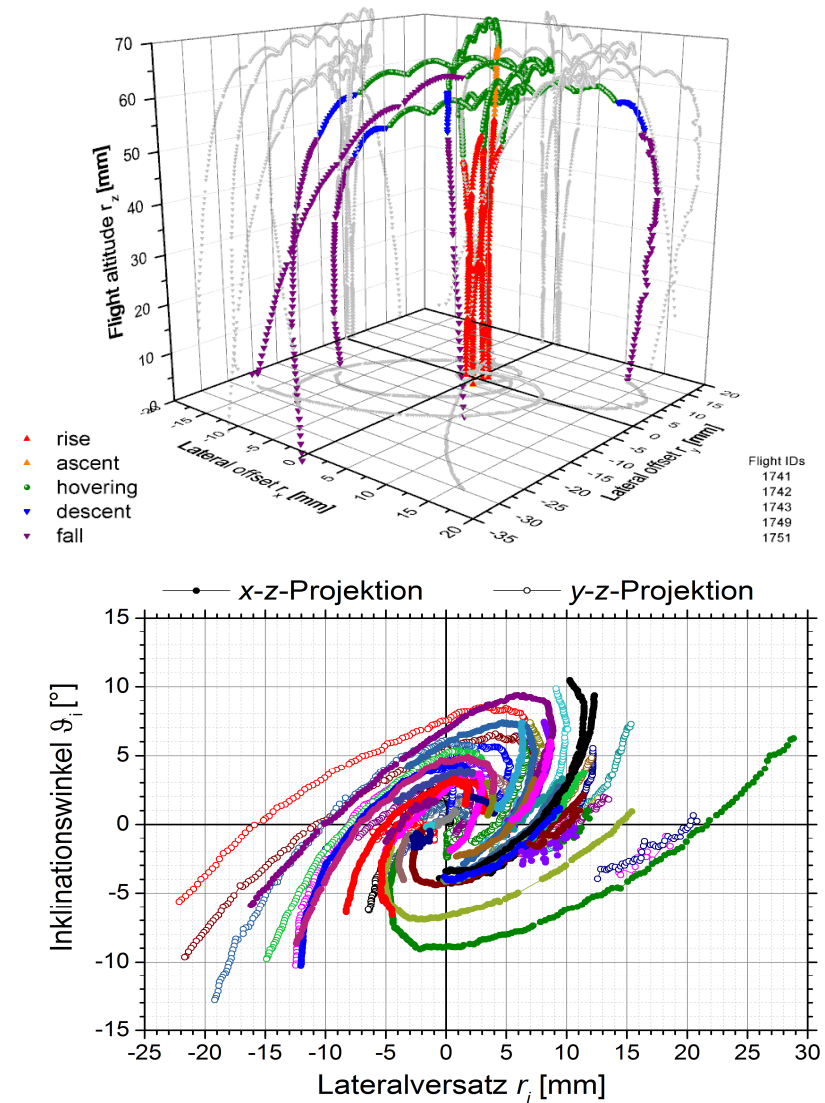
Trajektorienanalyse



- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (500 Bilder/s) aus 2 Perspektiven (45°-Spiegel)
- Rekonstruktion von Trajektorie und räumlicher Orientierung
- Bestimmung der Impulskomponenten

S. Scharring et al, Beam-Riding Analysis of a Parabolic Laser-thermal Thruster, AIP Conf. Proc. **1402**, 115 – 131 (2011)

S. Scharring, Dissertation, Universität Stuttgart (2013)



Aerospace Laser Propulsion Engine

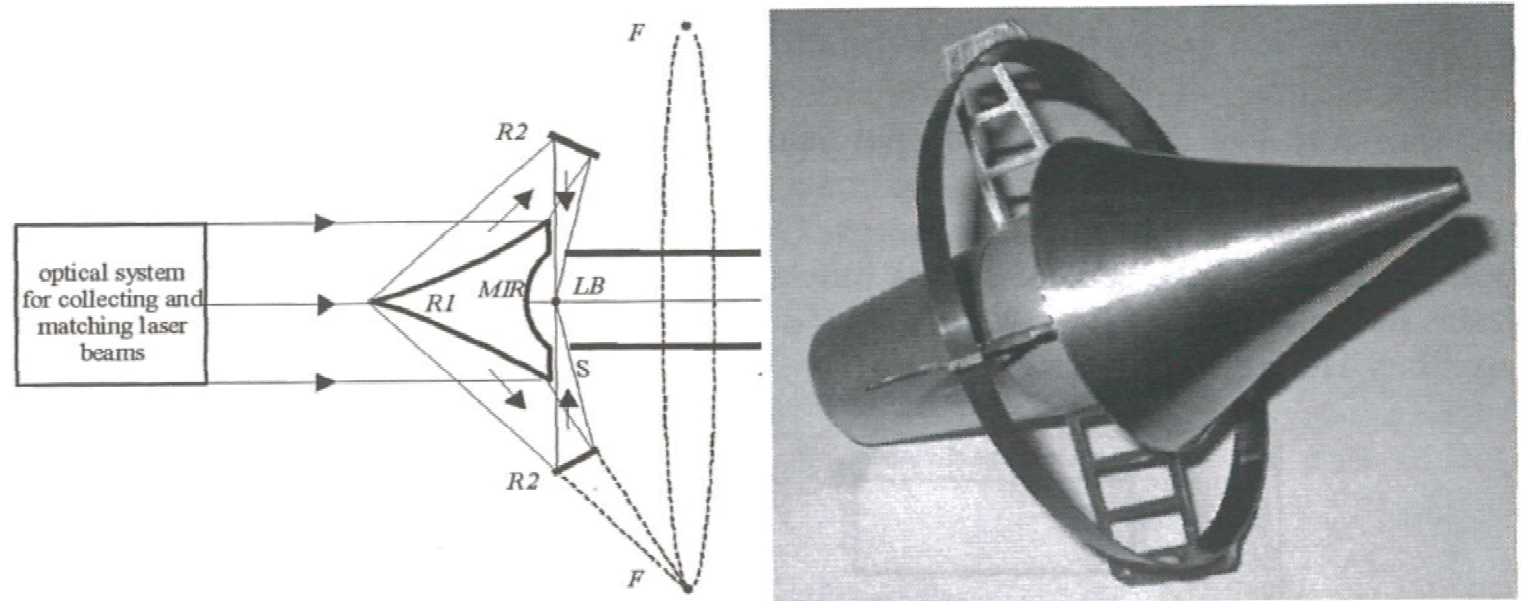
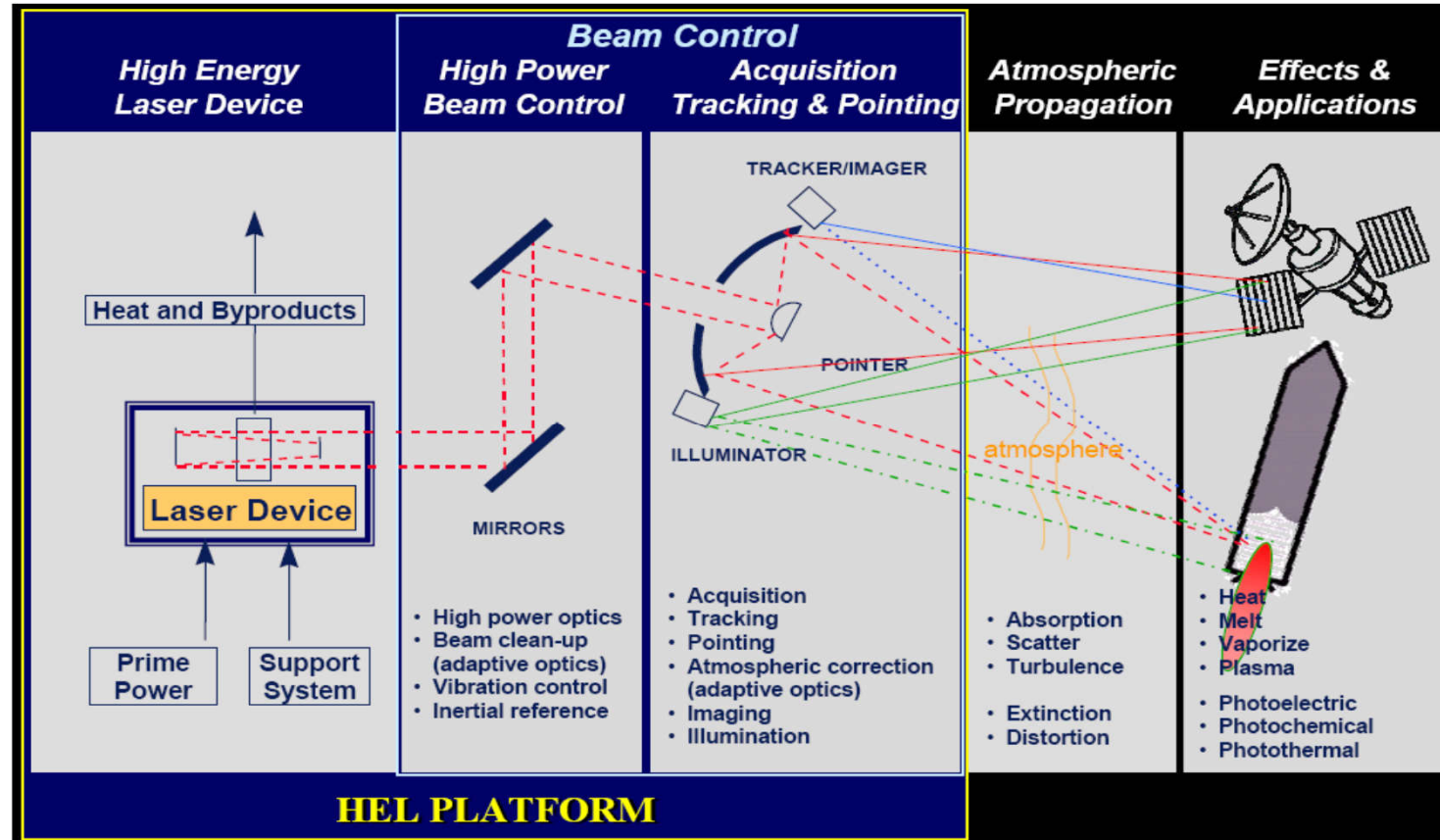


FIGURE 1. General Optical Scheme, Assembling, and a Photo of the ASLPE Model.

Yu. A. Rezunkov et al, Performance Characteristics of Laser Propulsion Engine Operating both in CW and in Repetitively-Pulsed Modes, AIP Conf. Proc. **830**: 3 – 13 (2006)

- Traktorstrahl
- gepulst & cw-Betrieb möglich
- CHO-Polymere als Treibstoffe

Konzeptionelle Überlegungen



J.R. Cook, Atmospheric Applications of High Energy Lasers, Proc. Of XV International Symposium on GCL-HPL 2004 Prague



Energiebilanz



$$E_{kin} = 1/2 m v^2 = \eta_{prop} \psi^{-1} \alpha \beta \gamma \delta \cdot E_{wall}$$



Antriebseffizienz

η_{prop}

• Kinetische Energie des Lightcrafts

Mechanische Effizienz

ψ^{-1}

• Energiekopplung zum Lightcraft

Expansionseffizienz

α

• Kinetische Energie des Treibstoffjets

Absorptionseffizienz

β

• Innere Energie des Treibstoffes

ggf.:
Detonation
Verbrennung

mQ/E_L

• Laserpulsenergie am Treibstoff

Transmissionseffizienz

γ

• Ursprüngliche Laserpulsenergie

Laserwirkungsgrad

δ

• Elektrische Energie



Constant momentum mission

Dynamische Anpassung:

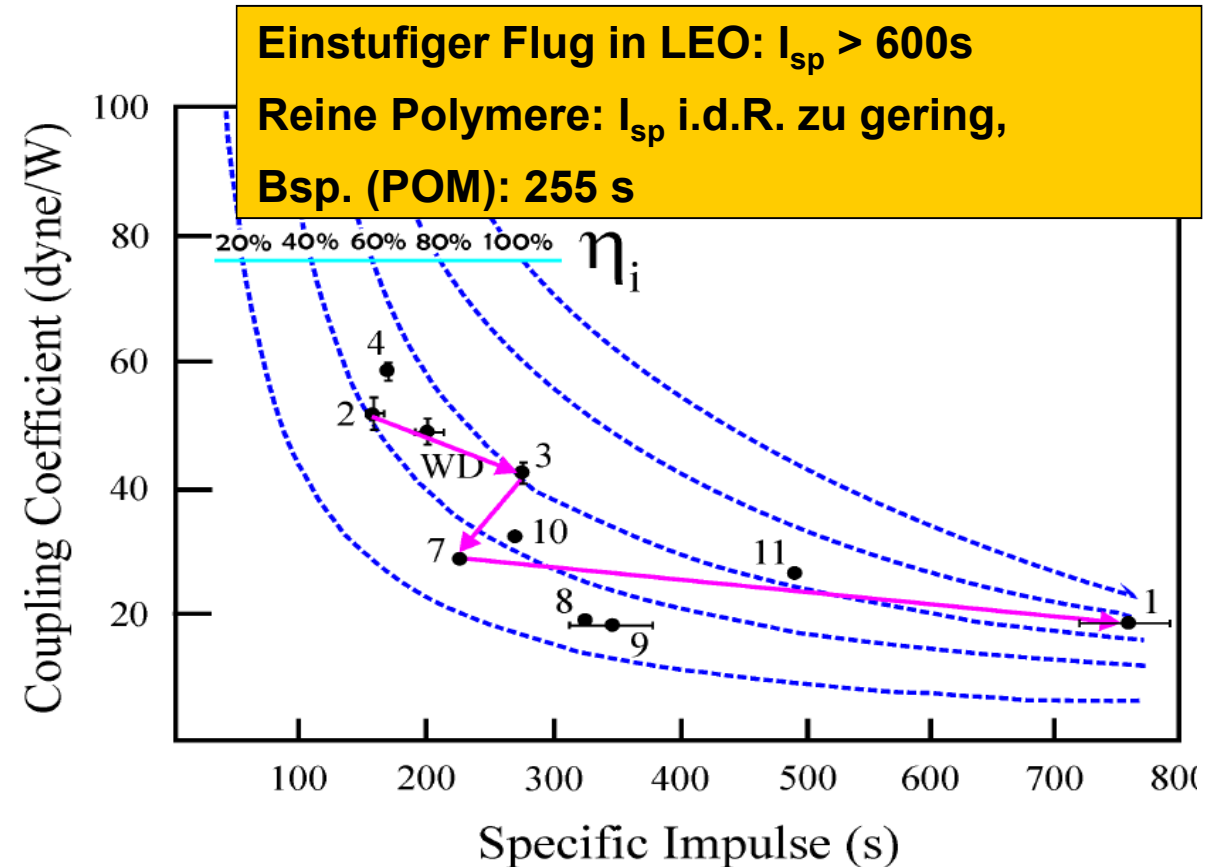
$$v_{\text{jet}} = v_{\text{rocket}} \\ \text{anstelle von} \\ v_{\text{jet}} = \text{const.}$$

Hohes c_m : 485 N/MW
Ammoniumperchlorid (AP)

Hoher I_{sp} : 754 s
Teflon (PFTE)

Zeitliche Variation der
Treibstoffzusammensetzung

Larson, C.W., Mead, F.B, Knecht, S.D., Laser Propulsion and the Constant Momentum Mission, AIP Conf. Proc. **702**, 216 – 227 (2004)
Pakhomov, A.V., Mahaffy, K.E., Binary Solid Propellants for Constant Momentum Missions, AIP Conf. Proc. **997**, 266 – 279 (2008)

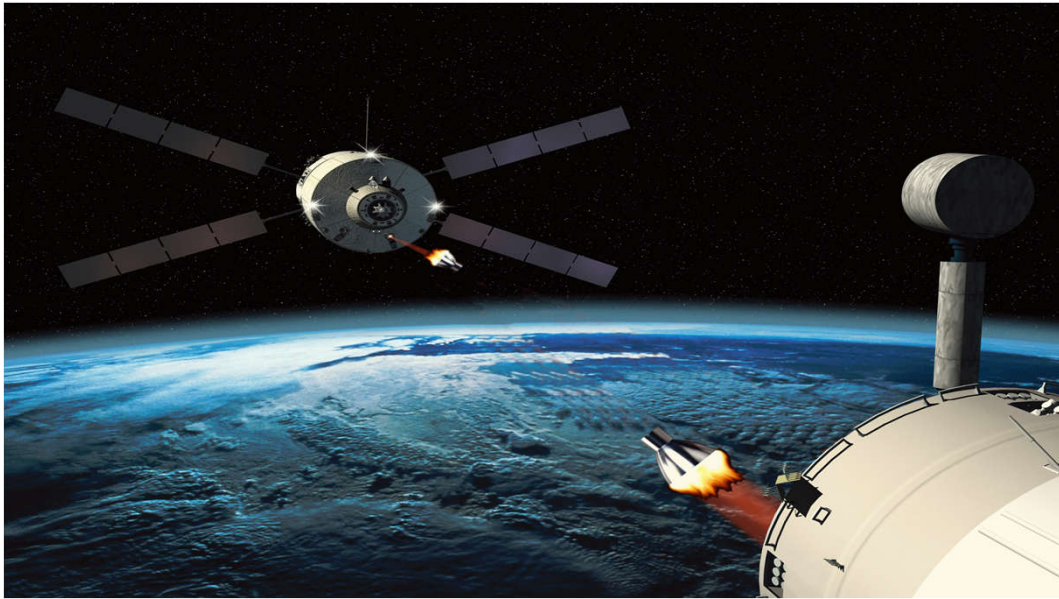


Systembetrachtungen

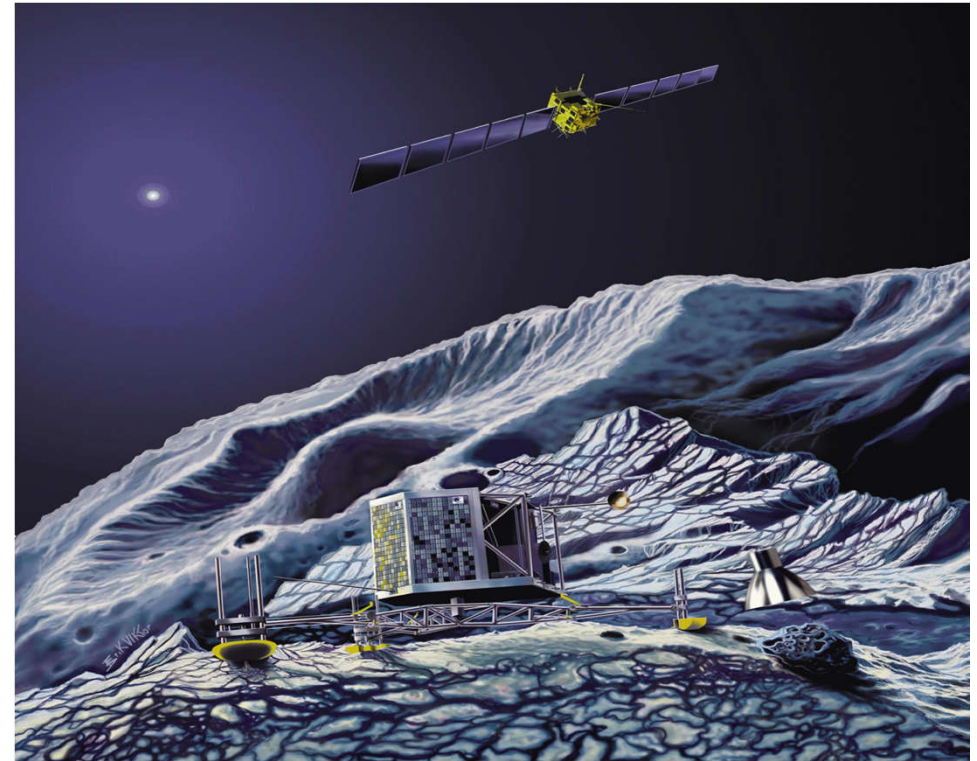
- Teleskop mit einer Reichweite bis zu 1000 km
- adaptive Optik erforderlich
- Mittlere optische Laserleistung:
 - 0,2 ... 1 MW / kg Nutzlast
 - hohe Anfangsinvestition
- Externe Energiequelle:
 - günstiges Masse/Nutzlast-Verhältnis
 - Einfache Antriebstechnologie
 - geringe Startkosten
 - hohe Startfolge



Weltraumgestützte Alternativen



Logistische Missionen



Probenrücksendung

Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft
- > **3.4 unkooperative Objekte**
 - > 3.4.1 Beseitigung von Weltraumschrott
 - > 3.4.2 Kollisionsvermeidung bei Weltraumschrott
 - > 3.4.3 Kollisionsvermeidung bei Asteroiden

4 Zusammenfassung



Bedrohung durch Weltraummüll



Kollisionen

Größenordnungen letaler Objekte:

„Autos“ – 1%

einfaches Tracking und Ausweichen

„Radkappen“ – 3%, > 10 cm, < 2 kg

schwieriges Tracking und Ausweichen

„Granatsplitter“ – 96 %, > 1 g

derzeit kein Tracking,
kein Ausweichen möglich

Kessler- Syndrom



nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014



Konzepte

Space-borne System

Schall 1990

Laser: 30 ... 100 kW, 100 Hz

Range: < 100 km



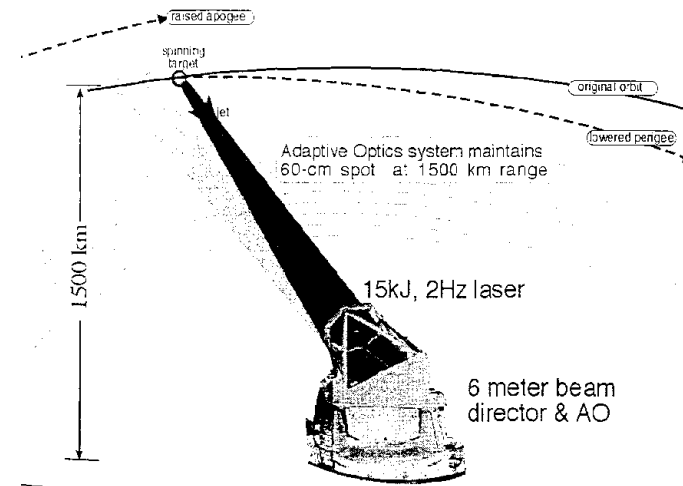
from: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

Ground-based System (Orion)

Phipps et al. 1996

Laser: 15 kJ, 2 Hz

Range: 1500 km



EU-Projekt 2011 – 2014 (F, D, E, P)

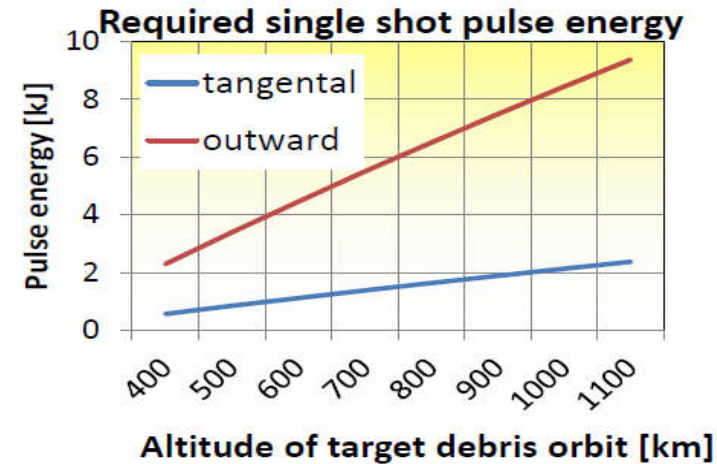
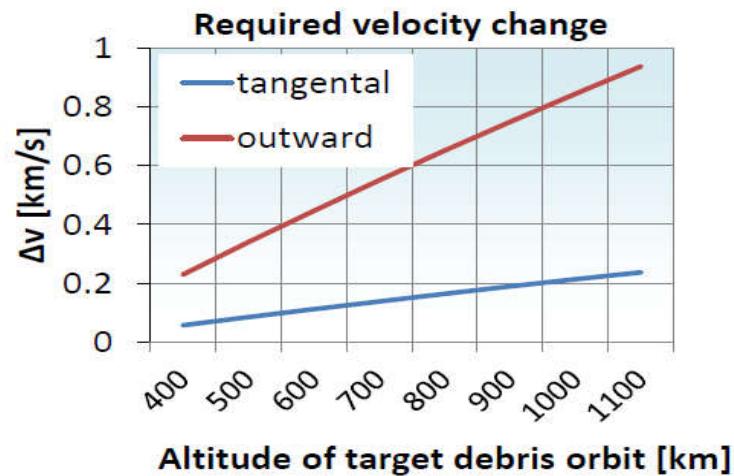
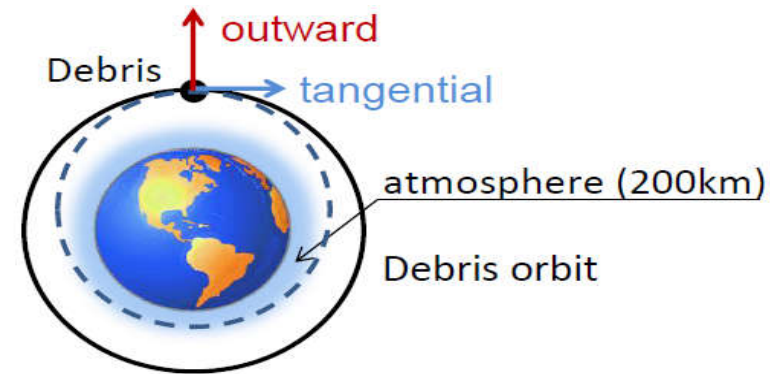
<http://www.clean-space.eu/>



Ground-based debris removal with lasers

Conditions:

- Debris' mass 1 g
- Momentum coupling coefficient $C_m = 10 [\text{dyn/W}] = 100 \text{ N/MW}$
- atmospheric re-entry begins at the altitude of 200 km



K. Kawakami, Phase Conjugate Light Generation for Space Debris Removal, Proceedings of HPLA/BEP 2014

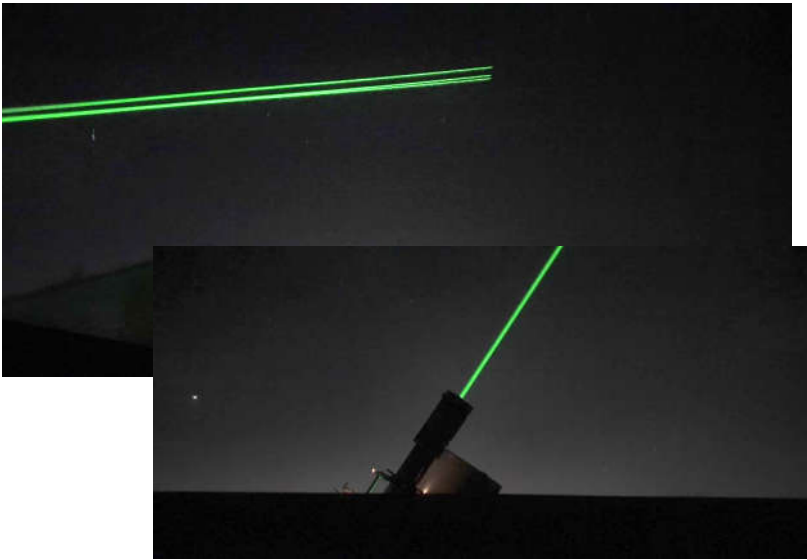


Space debris detection, ranging & tracking

- ▶ Detection of space debris in the cm – dm range under twilight conditions
- ▶ Tracking precision: 0.1 – 1 arcsec
- ▶ Laser ranging from time-of-flight data



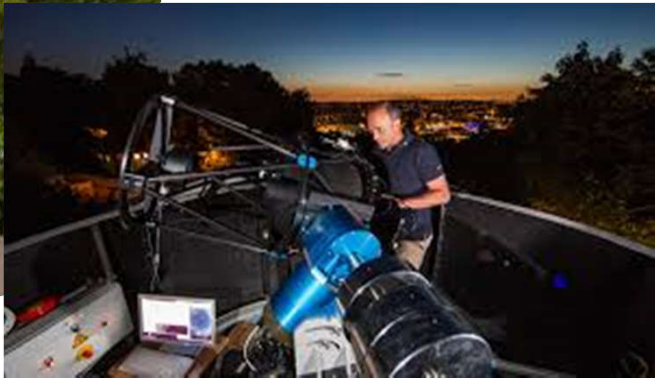
Space debris trajectory under twilight observation



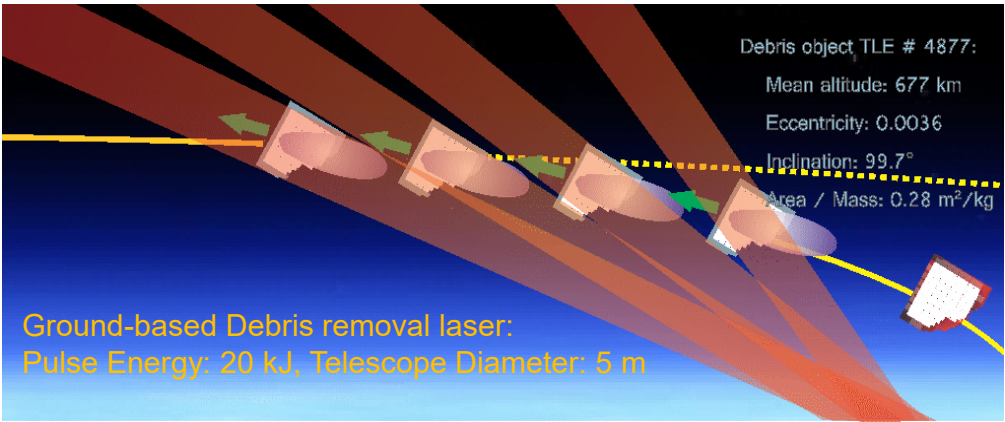
Laser tracking of space debris
ILRS station Borowiec, Poland



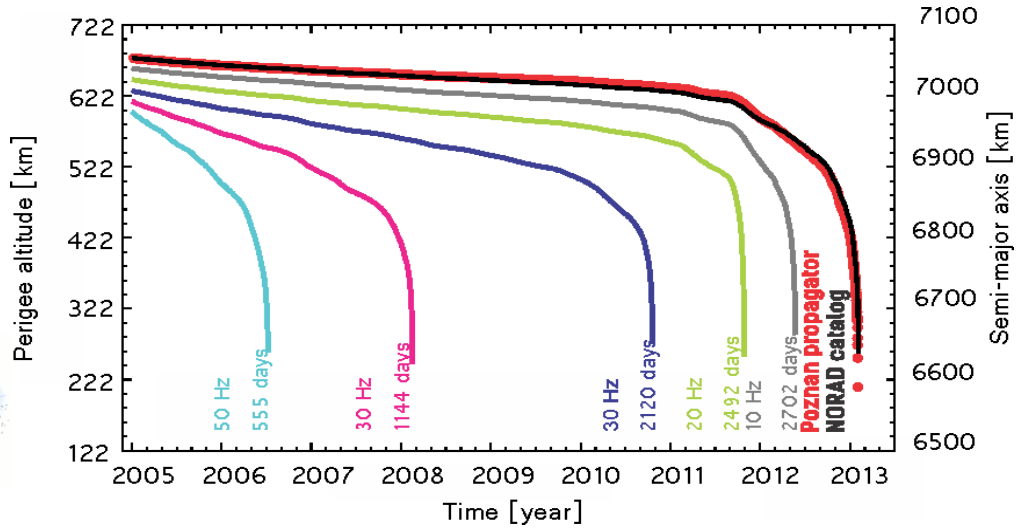
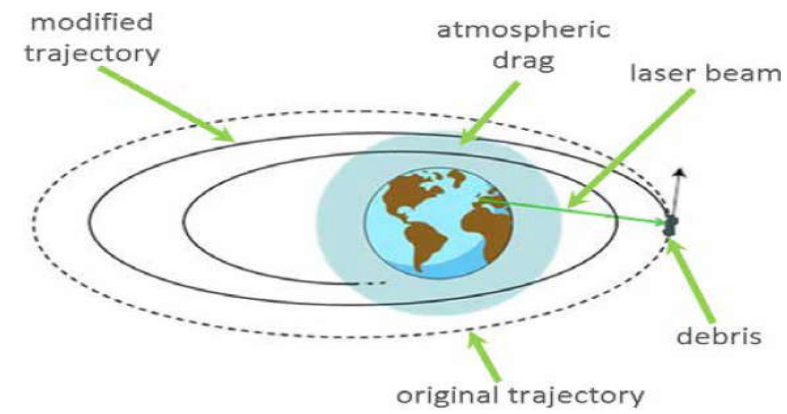
Observatory
Uhlandshöhe, Stuttgart



CLEANSPACE – Removal of space debris

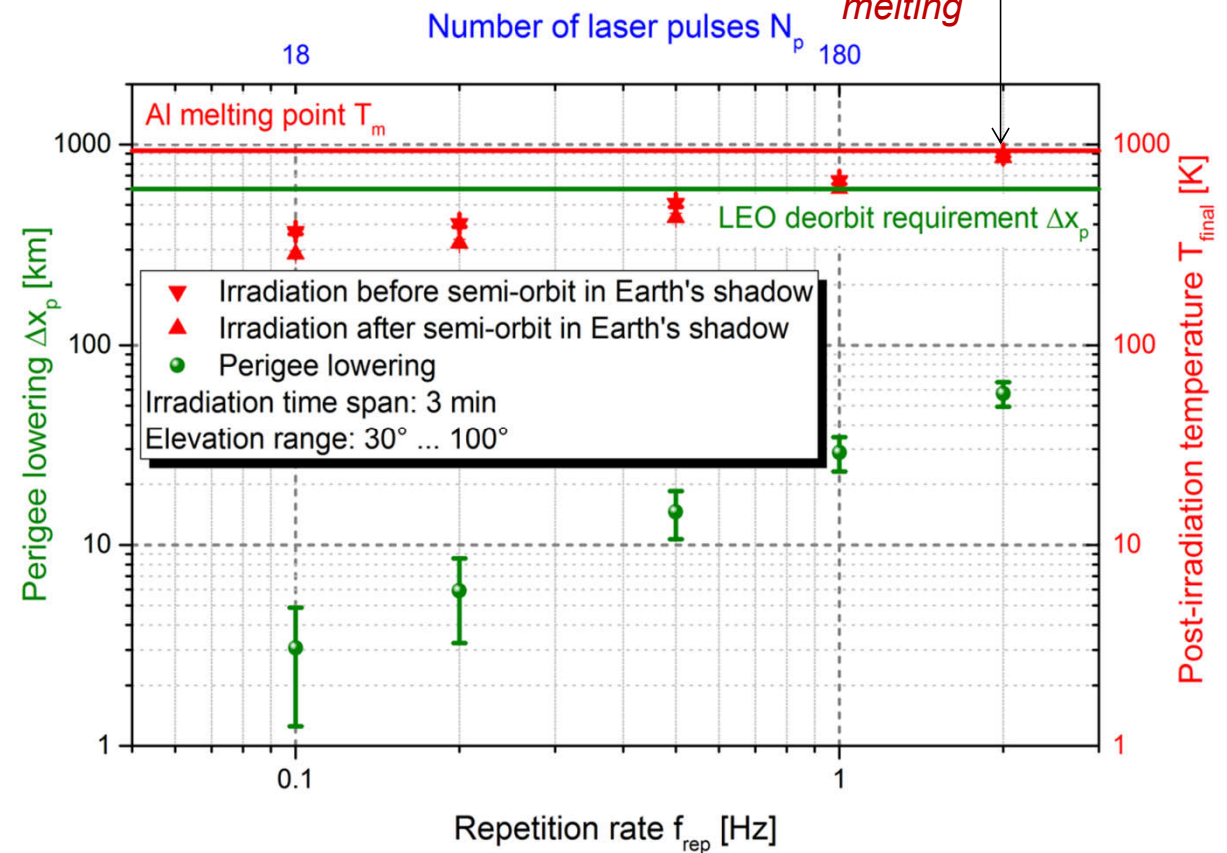
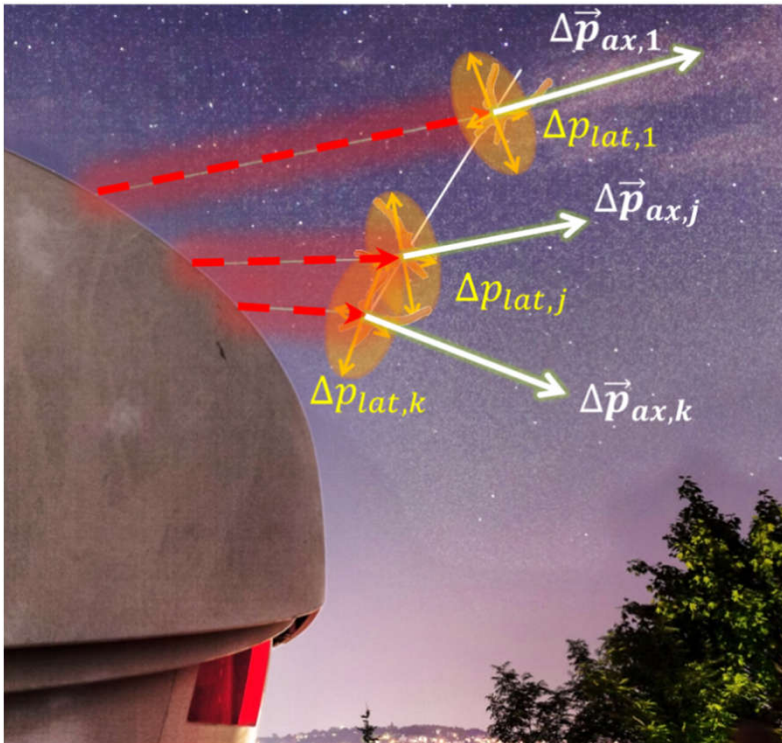


- Spot size at the target: \varnothing 0,5 m
- Laser pulse $E_L \leq 15 \text{ kJ} \rightarrow \Phi \geq 7,5 \text{ J/cm}^2$
- Repetition rate $f_{rep} > 10 \text{ Hz} \rightarrow \bar{P} > 150 \text{ kW}$
- Wavelength: $\lambda = 1,0 \dots 1,1 \mu\text{m}$



Heat accumulation and predictability of momentum transfer

*Multi-pass irradiation
required to prevent
melting*



S. Scharring et al., Opt. Eng. 58(1): 011004 (2018) (Open access)
<http://spie.org/publications/journal/10.1117/1.OE.58.1.011004?SSO=1>



Debris collision avoidance using photon pressure

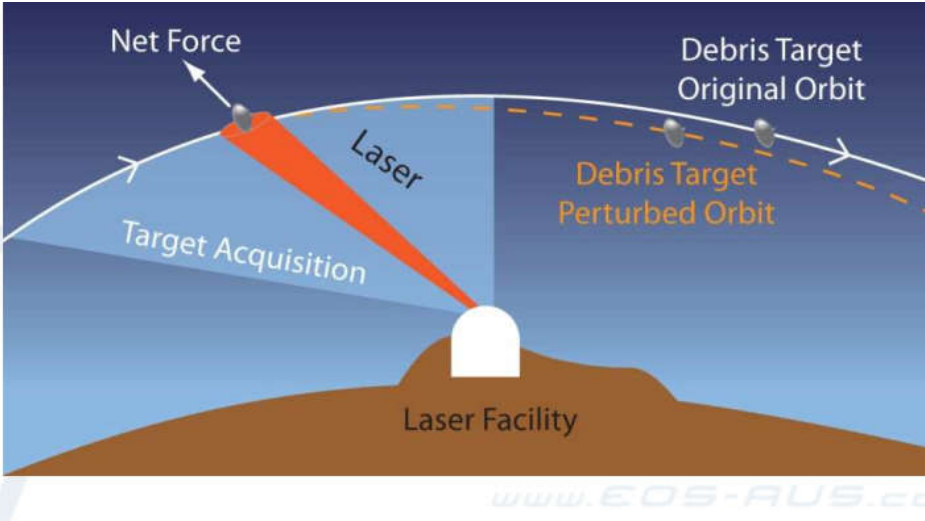
$$\vec{F} = c_m \cdot I \cdot A \cdot \hat{k} \quad c_m = 3.3 \text{ nN/W}$$

Collision avoidance: $\Delta v = 1 \text{ cm/s} \rightarrow \Delta x = 2.5 \text{ km/d}$

J. Mason et al., Adv. Space Res. **48**: 1643 (2011)
doi:10.1016/j.asr.2011.08.005

$$\Delta v = \frac{F \cdot \Delta t}{m} = \frac{c_m \cdot I \cdot A_{proj} \cdot \Delta t}{m} = \frac{c_m \cdot P_L \cdot \Delta t}{m}$$

(Target projected area \equiv Laser spot area)



Single transit, irradiation time $\Delta t = 5$ min, direction change neglected

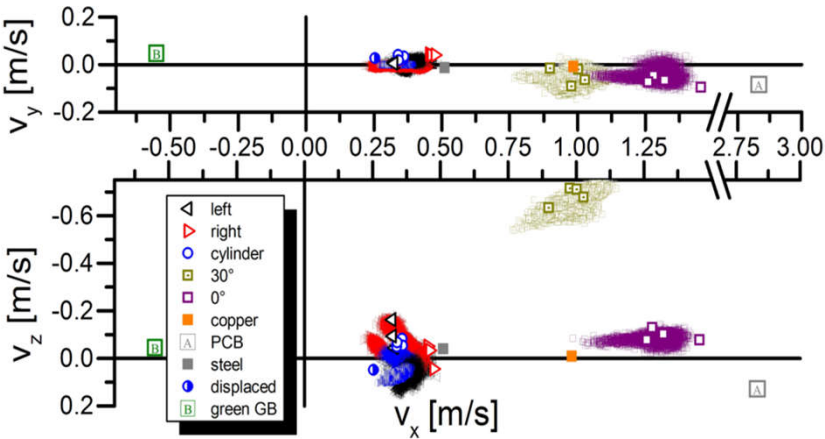
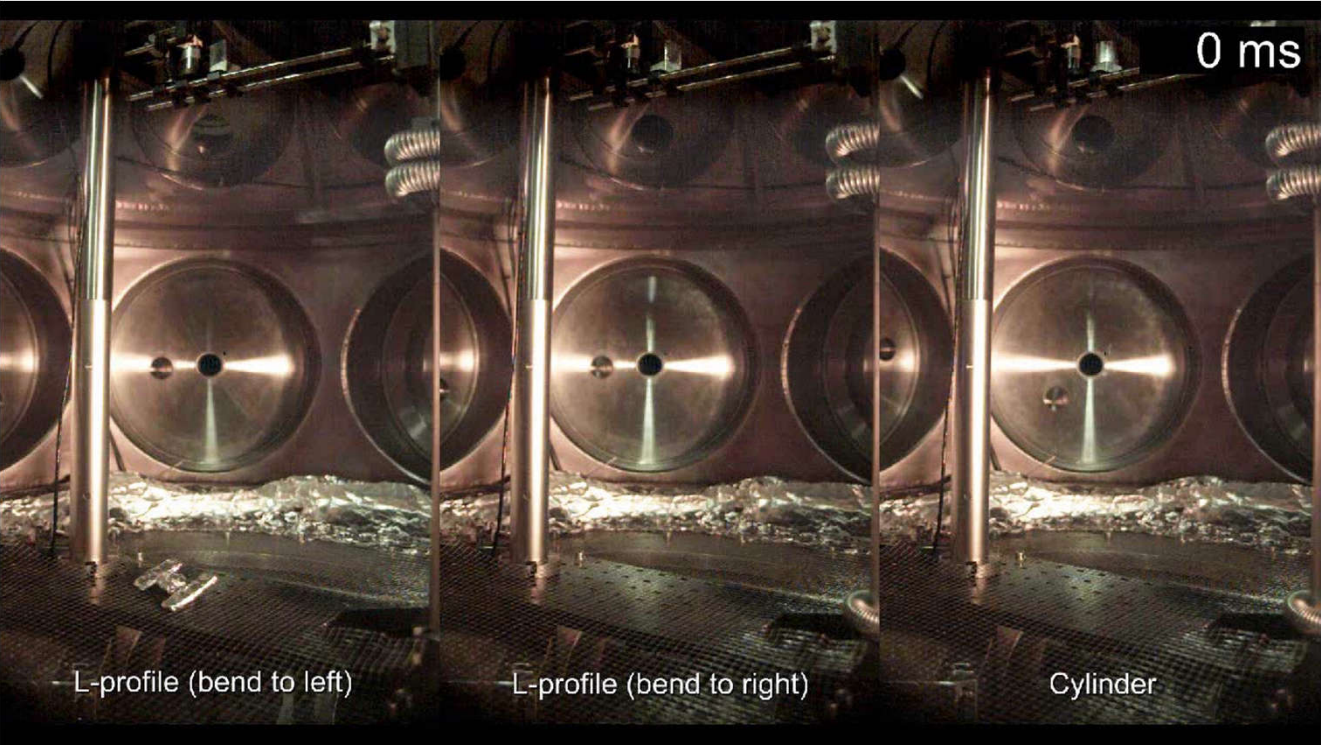
$$\rightarrow \Delta v = \frac{3.3 \mu N / kW \cdot P_L [kW] \cdot 300 s}{m} = \frac{P_L [kW] \cdot 1 mNs}{m} = \underbrace{1 \text{ mm/s} \cdot \frac{P_L [kW]}{m [kg]}}_{\text{(absorptive)}} \rightarrow \underbrace{2 \text{ mm/s} \cdot \frac{P_L [kW]}{m [kg]}}_{\text{(reflective)}}$$

Example: Westpac Satellite, $m = 23.8 \text{ kg}$, Retro-Reflection: $c_m = 2/c$

$$\rightarrow \Delta v = 84 \mu m/s \cdot P_L[kW] \quad \rightarrow \Delta v = 0.84 mm/s \quad \rightarrow N_{transits} \geq 12$$

$$P_L = 10 kW$$

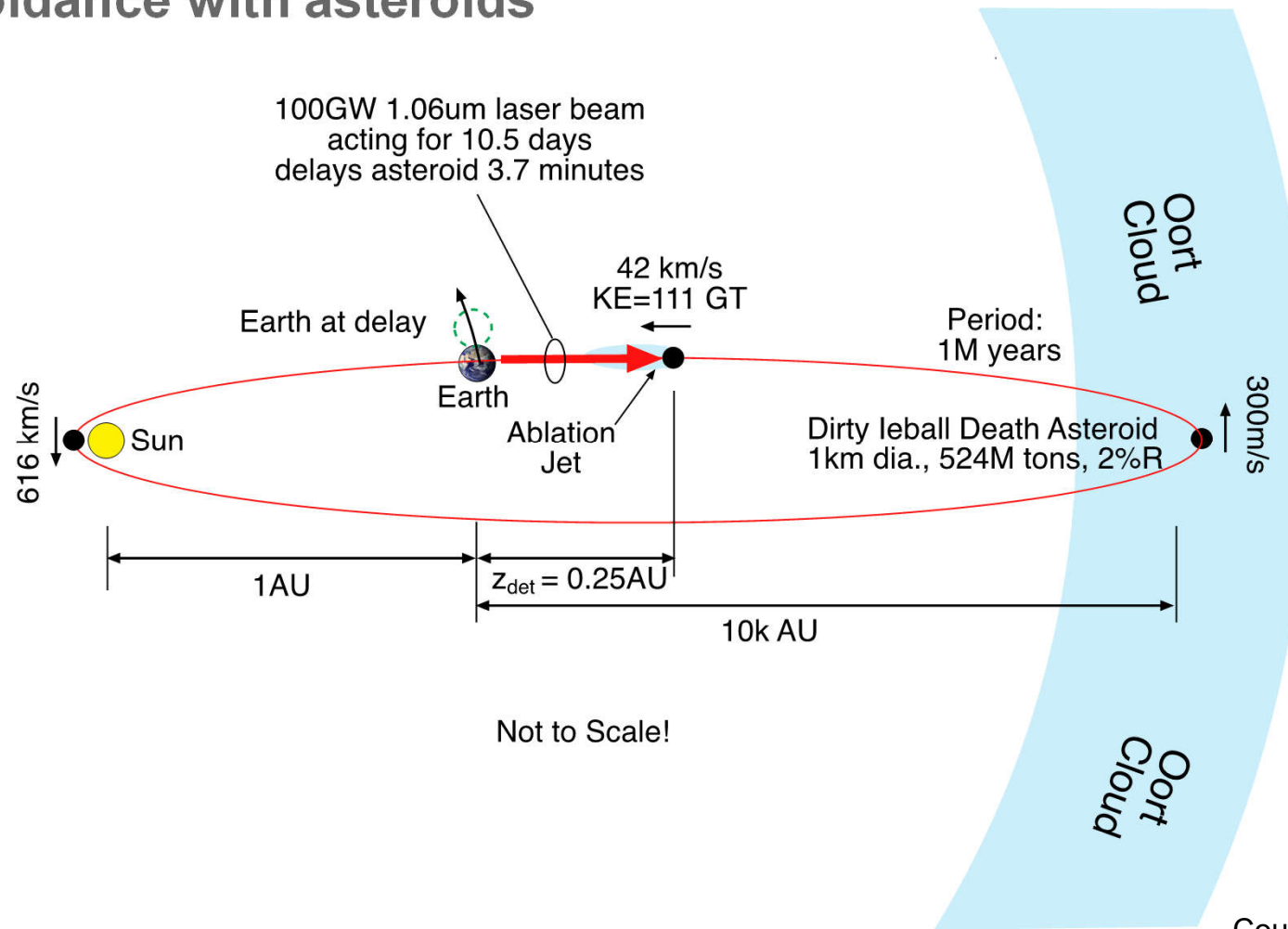
Collision avoidance with a single laser pulse



R. Lorbeer et al., *Scientific Reports* **8**: 8453 (2018) (open access)
<http://www.nature.com/articles/s41598-018-26336-1>



Collision avoidance with asteroids



Courtesy of Claude Phipps

Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3 Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft
- > 3.4 unkooperative Objekte

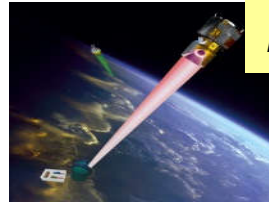
4 Zusammenfassung



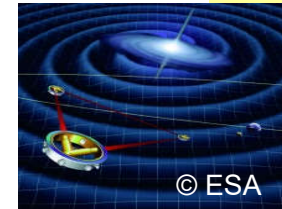
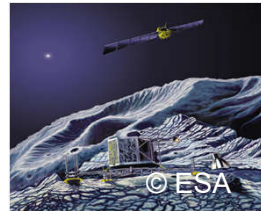
Laser power scaling and respective fields of application



Photon propulsion



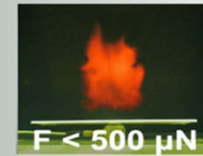
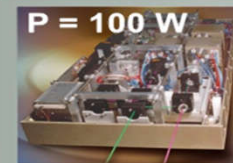
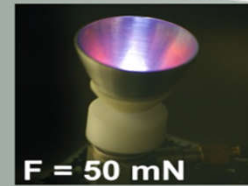
Lightcraft
Debris removal



Micropropulsion
Debris nudging
Laser photovoltaics



$$c_m = \frac{\text{thrust}}{\text{laser power}}$$



Long-term vision

Mid-term application

Current research

→ What can be achieved in our lifetime?



... What has been achieved in *their* lifetime?

Albert Einstein (1879 – 1955)

- 1916: Stimulated emission of light postulated
- Minor technological relevance (first MASER emission, 1954)
- Albert Einstein dies 1955.
- The success story of lasers: not anticipated
 - First Ruby laser: 1960
 -
 -

Stephen Hawking (1942 – 2018)

- 1963: ALS disease diagnosed; predicted lifetime: + 2 years
- 1966: PhD at Cambridge University
- Theory of singularities, quantum gravitation
- 1988: A Brief History of Time
- Stephen Hawking dies 2018.



Unkonventionelle Antriebe & Ideen

Das Brechen von Regeln ist der erste Schritt zur Innovation.

Wie wird aus einer Raupe ein Schmetterling? - Erste Aufgabe: Treten Sie nicht drauf.

Üben Sie die Erste Hilfe der Ideenrettung: Don't criticize, improve.

„Geht nicht!“ heißt oft, dass die Idee nicht verstanden wurde.

Das Bekannte zu verlassen, braucht immer außergewöhnliche Kraft.

Vor jedem Erfolg steht nicht nur die Bereitschaft zu scheitern, sondern tatsächlich das Scheitern.

Alte Ideen stehen neue Ideen immer im Weg. Das Normale ist der Kampf neuer Ideen gegen alte Ex-Ideen.

Jeder Mensch hat zu jedem Begriff ein Vorurteil.

Wer berechnet, was es kostet, nichts zu riskieren?

Martin Gaedt, Rock your idea, Murmann Verlag (2016)



Abbildungsnachweis

- DLR – Institut für Technische Physik: Seite 15,20,22-26,34,36,37,40,42,45,46,49,55,56,58,62-67,72-76,78,87-92,95,97,98,100
- Seite 19: Quander Metall- und Lasertechnik, <http://www.quander.de/lasertechnik/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Entertainment Weekly, <http://www.telegraph.co.uk/film/star-wars-the-force-awakens/facts-characters-best-scenes/> zuletzt aufgerufen: 12.01.2016
 - EPA (Handout), in Die Presse.com, Aufblasbarer Weltraumaufzug soll 200 Kilometer hoch werden, 19.06.2009 , <http://diepresse.com/home/science/488552/Aufblasbarer-Weltraumaufzug-bis-in-200-Kilometer-Hohe>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Ascending Technologies, in: online Focus, Mini-Hubschrauber - Verkehrsüberwachung per Fernsteuerung, 01.02.2012, http://www.focus.de/auto/news/mini-hubschrauber-verkehrsueberwachung-per-fernsteuerung_aid_709334.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Dr. med. Inken Lamcke, Femto- Lasik – PRK, 2013, <http://www.augenarzt-berlin.com/femto-lasik-prk/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Nations Wiki, Death Star I, http://nations.wikia.com/wiki/Death_Star_I, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Bundeshandelsschule und Bundeshandelsschule Völkermarkt, Photonenantrieb, <http://www.hak-vk.at/index.php?id=2861>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 21: The New York Times, Arthur R. Kantrowitz, Whose Wide-Ranging Research Had Many Applications, Is Dead at 95, 9.12. 2008, http://www.nytimes.com/2008/12/09/science/09kantrowitz.html?_r=0, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Apogee Books, Author Biographies – Leik Myrabo, http://www.apogeespacebooks.com/Author_Bios/leik_myrabo.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 25: NASA – National Space Science Data Center, Sputnik 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1957-001B>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Smithsonian National Air and Space Museum,
 - Heise Foto, Erich Kapfenberger, Dampflok, <http://www.heise.de/foto/galerie/foto/Dampflok-cc8ca0aab40ec62ada6180479fac5c82/>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Bahnbilder aus dem Rhein-Main-Gebiet, Kai Hesse, http://www.bahnbilder.net/bilder/03-10-07/IMG_6597.jpg, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 28: Deutscher Schaustellerbund in: Impulse, 22.11.2013, <http://www.impulse.de/leben/talfahrt-fur-wilde-karusselle-wie-sich-das-geschafft-der-schausteller-verandert>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - Best Greetings, e-Cards, Orkut Scraps, Glitter Graphics 4 All- Copy and Paste, <http://easyscraps.blogspot.de/2010/09/free-emoticons-for-orkut.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - SmilieCenter, Big smilies 0031, http://www.smiliecenter.de/0/big/big_smilies_0001.htm, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014



Abbildungsnachweis

- Seite 32: Wikipedia in http://www.klangspiel.ch/laser_pointer_red_774/, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 33: National Ignition Facility, <https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery>, zuletzt aufgerufen: 27.01.2017,
- RP Photonics Encyclopedia – YAG Lasers, http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 35: BATOP Optoelectronics, <http://www.batop.com/information/microchip-laser.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 40: Lisa Pathfinder Mission, EADS Astrium, <http://gallery.astrium.eads.net/app/photopro.sk/astrium/detail?docid=92>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 41: MIT, Archimedes Death Ray: Idea Feasibility Testing, October, 2005, http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 47: Breakthrough Starshot, <http://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>
- Seite 64: Edge-Wave IS-Series, <http://www.edge-wave.de/web/produkte/short-pulse-systeme/is-serie/>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 65: SFB 716, Laserablation in Metallen, <http://www.sfb716.uni-stuttgart.de/forschung/teilprojekte/projektbereich-b/b5/ergebnisse.html>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014

